



COMMISSION EUROPÉENNE

Prévention et réduction intégrées de la pollution (IPPC)

**Document de référence sur les meilleures techniques disponibles
dans les industries des métaux non-ferreux**

Décembre 2001

Résumé

Le présent document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans les industries des métaux non-ferreux rend compte de l'échange d'informations qui a été organisé conformément à l'article 16 (2) de la directive 96/61/CE du Conseil. Il convient de le lire en le rapprochant de la Préface qui décrit ses objectifs et son utilisation.

Pour couvrir le domaine complexe de la production des métaux non-ferreux, il a fallu définir une approche permettant de regrouper dans un même document la production de métaux à partir de matières premières primaires et secondaires, en divisant ce document en 10 groupes de métaux. Ces groupes sont :

- le cuivre (y compris Sn et Be) et ses alliages,
- l'aluminium,
- le zinc, le plomb et le cadmium, (+ Sb, Bi, In, Ge, Ga, As, Se, Te),
- les métaux précieux,
- le mercure,
- les métaux réfractaires,
- les ferroalliages,
- les métaux alcalins et alcalinoterreux,
- le nickel et le cobalt,
- le carbone et le graphite.

Un groupe particulier a été prévu pour le carbone et le graphite car la production de ces matériaux est souvent une activité intégrée aux usines d'aluminium primaire. Les procédés de grillage et de frittage des minerais et des concentrés ainsi que les procédés de production de l'alumine ont été, lorsqu'il convenait, inclus dans ces groupes. Le document ne couvre pas les opérations d'extraction et de transformation des minerais effectuées à la mine elle-même.

Dans le document, l'information est présentée en douze chapitres : les informations générales dans le chapitre 1, les procédés communs dans le chapitre 2 puis les procédés de production métallurgique concernant les dix groupes de métaux dans les chapitres 3 à 12. Enfin, le chapitre 13 présente les conclusions et les recommandations. Des annexes couvrant les coûts et les réglementations internationales sont également incluses. Les procédés communs décrits au chapitre 2 se répartissent comme suit :

- Utilisation du chapitre – installations complexes,
- Utilisation et déclaration des données d'émissions,
- Gestion, conception et formation,
- Réception, stockage et manutention des matières premières,
- Préparation et traitement préliminaire des matières premières et transfert aux procédés de production,
- Procédés de production du métal – types de fours et techniques de contrôle des procédés,
- Techniques de captage des gaz et de dépollution de l'air,
- Traitement des effluents et réutilisation de l'eau,
- Minimisation, recyclage et traitement des résidus des procédés (y compris les sous-produits et les déchets),
- Récupération des chaleurs perdues et de l'énergie,
- Effets croisés,
- Nuisances sonores et vibrations,
- Odeurs,
- Aspects de sécurité,
- Démantèlement des installations.

Chacun des chapitres 2 à 12 est organisé en plusieurs sections qui décrivent les procédés et les techniques appliqués, les niveaux actuels d'émission et de consommation, les techniques à prendre en compte dans la définition des MTD et les conclusions sur les MTD. Dans le chapitre 2, les conclusions

sur les MTD ne portent que sur la manutention et le stockage des matériaux, le contrôle des procédés, le captage et la dépollution des gaz, l'élimination des dioxines, la récupération du dioxyde de soufre, la réduction du mercure et le traitement des effluents et la réutilisation de l'eau. Il convient donc de lire les conclusions sur les MTD dans chacun des chapitres pour avoir une information sur l'ensemble des MTD.

1. L'industrie des métaux non-ferreux

Au moins 42 métaux, plus les ferroalliages, le carbone et le graphite, sont produits dans l'UE et trouvent des applications de toutes sortes dans la métallurgie, la chimie, la construction, les transports ou encore dans la production et le transport de l'électricité. Ainsi, le cuivre de haute pureté est indispensable pour la production et la distribution de l'électricité, et de petites quantités de nickel ou de métaux réfractaires permettent d'améliorer la résistance à la corrosion et d'autres propriétés de l'acier. Ils trouvent également des applications dans de nombreuses réalisations de haute technologie en particulier dans la défense, l'informatique, l'électronique et les télécommunications.

Les métaux non-ferreux sont produits à partir de toute une variété de matières premières primaires et secondaires. Les matières premières primaires proviennent des minerais extraits et traités qui subissent ensuite la transformation métallurgique donnant le métal brut. Les transformations des minerais sont effectués en général dans des installations proches des mines. Les matières premières secondaires sont des déchets et des résidus collectés localement qui devront parfois, eux aussi, subir un prétraitement pour les débarrasser de revêtements appliqués.

En Europe, les gisements de minerais contenant des métaux en concentrations viables se sont progressivement épuisés et seules quelques sources locales subsistent. La plupart des concentrés sont donc importés de diverses sources mondiales.

Le recyclage constitue une composante importante des approvisionnements de matières premières pour un certain nombre de métaux. Le cuivre, l'aluminium, le plomb, le zinc, les métaux précieux et les métaux réfractaires entre autres peuvent être récupérés de leurs produits ou de leurs résidus et réintroduits dans le procédé de production sans entraîner de perte de qualité lors du recyclage. Les matières premières secondaires représentent dans l'ensemble une proportion importante de la production et réduisent donc la consommation de matières premières et d'énergie.

Le produit de l'industrie est soit du métal affiné, soit ce qu'on appelle des demi-produits ou produits semi-finis, c'est-à-dire des métaux et des alliages obtenus sous forme de lingots coulés ou de formes travaillées, sous forme de profilés extrudés, de feuilles, tôles ou feuillards, de barres, etc.

La structure de l'industrie varie selon les métaux. Aucune société ne produit tous les métaux non-ferreux, même s'il existe quelques entreprises paneuropéennes qui produisent plusieurs métaux, par exemple du cuivre, du plomb, du zinc, du cadmium, etc.

La taille des sociétés productrices de métaux et d'alliages en Europe se décline sur un très large éventail, de quelques grandes entreprises de plus de 5 000 salariés à une multiplicité de petites entreprises de 50 à 200 personnes. Leur forme de propriété est également variable et comprend des groupes métallurgiques paneuropéens et nationaux, des holdings industriels, des sociétés publiques autonomes et des sociétés privées.

Certains métaux sont indispensables à l'état de traces mais, à des concentrations plus élevées, ils se caractérisent par la toxicité du métal, de l'ion ou des composés et nombre de métaux figurent dans diverses listes de produits toxiques. Le plomb, le cadmium et le mercure sont les substances les plus inquiétantes.

2. Problèmes environnementaux pour l'industrie

Dans l'élaboration de la plupart des métaux non-ferreux à partir de matières premières primaires, les principaux problèmes environnementaux à considérer sont les potentielles émissions atmosphériques de poussières, métaux et/ou composés métalliques et dioxyde de soufre provenant des opérations de grillage et de fusion des concentrés de sulfures métalliques et de la combustion des combustibles contenant du soufre ou autres matériaux contenant du soufre. La récupération du soufre et sa conversion ou son élimination tiennent donc une place importante dans la production des métaux non-

ferreux. Les procédés pyrométallurgiques sont des sources potentielles de poussières et de métaux provenant des fours, des réacteurs et du transfert de métal en fusion.

La consommation d'énergie et la récupération de chaleur et d'énergie jouent également un rôle considérable dans la production des non-ferreux. Elles dépendent de l'utilisation efficace du contenu énergétique des minerais sulfurés, de la demande énergétique des différentes phases du procédé, du type et de la méthode d'approvisionnement de l'énergie utilisée et de l'efficacité des méthodes de récupération de chaleur. Des exemples sont donnés au chapitre 2 du document.

Dans la production des métaux non-ferreux à partir des matières secondaires, les problèmes environnementaux principaux concernent aussi les rejets gazeux émis par les différents fours et transferts qui produisent des poussières, des métaux et, dans certaines phases du procédé, des gaz acides. Il faut également prendre en considération le risque de formation de dioxines due à la présence de petites quantités de chlore dans les matières premières secondaires. La question de la destruction et/ou du captage des dioxines et des COV reste posée.

Les principaux problèmes d'environnement liés à la production primaire d'aluminium sont la génération d'hydrocarbures polyfluorés et de fluorures durant l'électrolyse, la création de déchets solides dans les cuves d'électrolyse et la production de déchets solides durant la production de l'alumine.

La production de déchets solides est également un problème pour la production du zinc et d'autres métaux lors des étapes d'élimination du fer.

D'autres procédés font fréquemment appel à des réactifs dangereux tels que HCl, HNO₃, Cl₂ et des solvants organiques pour la lixiviation et la purification. Des techniques de traitement avancées permettent de confiner ces substances puis de les récupérer et de les réutiliser. L'étanchéité des réacteurs est ici un aspect important.

Dans la majorité des cas, les gaz de procédés sont épurés au moyen de filtres à manches, de sorte que les émissions de poussières et de composés métalliques tels que le plomb, sont réduites. L'épuration des gaz au moyen de laveurs humides et d'électrofiltres humides est particulièrement efficace lorsque le soufre des gaz de procédé doit être récupéré pour une unité de production d'acide sulfurique. L'utilisation des laveurs par voie humide est également efficace dans certains cas lorsque les poussières sont abrasives ou difficiles à filtrer. La mise en étanchéité des fours et les transferts et stockages en enceinte fermée sont des mesures importantes qui permettent d'éviter les émissions fugitives.

En résumé, les principaux problèmes posés par les procédés d'élaboration pour chacun des groupes de métaux comprennent les composés suivants :

- Pour la production du cuivre : SO₂, poussières, composés métalliques, composés organiques, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que garnissages de fours, boues, poussières sous filtres et laitier. La formation de dioxine lors de la production secondaire de cuivre est également un point à prendre en considération ;
- Pour la production d'aluminium : fluorures (y compris HF), poussières, composés métalliques, SO₂, COS, HAP, COV, gaz à effet de serre (PFC et CO₂), dioxines (production secondaire), chlorures et HCl. Résidus tels que résidus de bauxite, garnissages de cuve usés, poussières sous filtre et laitier salin et eaux usées (huile et ammoniac) ;
- Pour la production de plomb, de zinc et de cadmium : poussières, composés métalliques, composés organiques volatils (y compris dioxines), odeurs, SO₂, autres gaz acides, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que boues, résidus riches en fer, poussières sous filtre et laitier ;
- Pour la production de métaux précieux : COV, poussières, composés métalliques, dioxines, odeurs, NO_x, autres gaz acides tels que chlore et SO₂. Résidus tels que boues, poussières sous filtre et laitier et eaux usées (composés des métaux et composés organiques) ;
- Pour la production de mercure : vapeurs de mercure, poussières, composés métalliques, odeurs, SO₂, autres gaz acides, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que boues, poussières sous filtre et laitier ;

- Pour la production de métaux réfractaires, de poudre de métal dur et de carbures métalliques : poussières, composés solides de métal dur et de métaux, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que poussières sous filtre ; boues et laitiers. La fabrication du tantale et du niobium fait appel à des produits chimiques tels que l'acide fluorhydrique (HF) qui sont hautement toxiques. Il convient d'en tenir compte dans la manutention et le stockage de ces matériaux ;
- Pour la production des ferroalliages : poussières, composés métalliques, CO, CO₂, SO₂, récupération d'énergie, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que poussières sous filtre, boues et laitiers ;
- Pour la production de métaux alcalins et alcalinoterreux : chlore, HCl, dioxines, SF₆, poussières, composés métalliques, CO₂, SO₂, eaux usées (composés métalliques), résidus tels que boues, aluminates, poussières sous filtre et laitiers ;
- Pour la production de nickel et de cobalt : COV, CO, poussières, composés métalliques, odeurs, SO₂, chlore et autres gaz acides, eaux usées (composés métalliques et composés organiques), résidus tels que boues, poussières sous filtre et laitiers ;
- Pour la production de carbone et de graphite : HAP, hydrocarbures, poussières, odeurs, SO₂, prévention des eaux usées, résidus tels que poussières sous filtre.

3. Procédés appliqués

Un très large choix de matières premières est à la disposition des différentes installations et les procédés de production métallurgique utilisés sont donc très divers. Dans de nombreux cas, ce sont les matières premières qui déterminent le choix du procédé. Les tableaux suivants regroupent les types de fours utilisés pour la production des métaux non-ferreux :

Four	Métaux utilisés	Matériau utilisé	Commentaires
Sécheur à serpentins de vapeur Sécheur à lit fluidisé Sécheur flash	Cu et certains autres	Concentrés	
Four rotatif	La plupart des métaux devant subir un séchage. Vaporisation du ZnO. Calcination de l'alumine, du Ni et des ferroalliages. Brûlage de films photographiques pour production de métaux précieux. Déshuilage des déchets de Cu et d'Al.	Minerais, concentrés et déchets et résidus divers.	Applications de séchage, de calcination et de vaporisation. Utilisation en tant qu'incinérateur
Four à lit fluidisé	Cuivre et zinc Al ₂ O ₃	Concentrés Al(OH) ₃	Calcination et grillage
Machine de frittage à flammes directes	Zinc et plomb	Concentrés et matières secondaires	Frittage
Machine de frittage à vide	Zinc et plomb	Concentrés et matières secondaires	Frittage
Machine de frittage à bande d'acier	Ferro-alliages, Mn, Nb	Minerai	Autres applications possibles
Four à soles étagées	Mercure, Molybdène (récupération de rhénium)	Minerais et concentrés	Grillage, calcination

Fours de séchage, grillage, frittage et calcination

Four	Métaux utilisés	Matériau utilisé	Commentaires
Creusets fermés à garnissage réfractaire	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques	
Fours à puits ouvert	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques	
Baiyin	Cuivre	Concentrés	
Four à arc électrique	Ferroalliages	Concentrés, minerai	
Contop/Cyclone	Cuivre	Concentrés	
Four à arc électrique immergé	Métaux précieux, cuivre, ferroalliages	Laitier, matériaux de deuxième fusion, concentrés	Pour la production des ferroalliages, on utilise les types ouverts, semi fermés et fermés
Four rotatif	Aluminium, plomb, cuivre, métaux précieux	Déchets et autres produits de deuxième fusion, cuivre blister	Oxydation et réaction avec le substrat
Four rotatif basculant	Aluminium	Déchets et autres produits de deuxième fusion	Minimise l'utilisation de fondants salés
Four réverbère	Aluminium, cuivre et autres	Déchets et autres produits de deuxième fusion, cuivre noir	Fusion des concentrés de Cu ailleurs dans le monde
Vanyucov	Cuivre	Concentrés	
ISA Smelt/Ausmelt	Cuivre, plomb	Produits intermédiaires, concentrés et matières secondaires	
QSL	Plomb	Concentrés et matières secondaires	
Kivcet	Plomb, cuivre	Concentrés et matières secondaires	
Noranda	Cuivre	Concentrés	
El Teniente	Cuivre	Concentrés	
TBRC	Cuivre (TBRC)	La plupart des matières secondaires y compris les boues	
TROF	Métaux précieux		
Mini Smelter	Cuivre/plomb/étain	Déchets	
Haut fourneau et ISF	Plomb, plomb/zinc, cuivre, métaux précieux, ferromanganèse à haute teneur en carbone	Concentrés, la plupart des matières secondaires	Utilisé uniquement avec récupération d'énergie dans la production de ferromanganèse.
Four Flash Inco	Cuivre, nickel	Concentrés	
Four Flash Outokumpu	Cuivre, nickel	Concentrés	
Procédé Mitsubishi	Cuivre	Concentrés et déchets d'anode	
Peirce Smith	Cuivre (convertisseur), ferroalliages, production d'oxydes métalliques	Matte et déchets d'anode	
Hoboken	Cuivre (convertisseur)	Matte et déchets d'anode	
Convertisseur Flash	Cuivre (convertisseur)	Matte	
Outokumpu			
Convertisseur Noranda	Cuivre (convertisseur)	Matte	
Convertisseur Mitsubishi	Cuivre (convertisseur)	Matte	

Fours de fusion et d'affinage

Four	Métaux utilisés	Matériau utilisé	Commentaires
À induction	La plupart	Métal de première fusion et déchets	L'agitation induite favorise le processus d'alliage. Procédé sous vide pour certains métaux
Four à bombardement électronique	Métaux réfractaires	Métal de première fusion et déchets	
Four rotatif	Aluminium, plomb	Différentes qualités de déchets	Fondants et sels utilisés pour les matrices complexes
Four réverbère	Aluminium (primaire et secondaire)	Différentes qualités de déchets	La configuration du bain ou de la sole peut varier. Fusion ou maintien
Contimelt	Cuivre	Anodes de cuivre, déchets neufs et cuivre blister	Système de four intégré.
À cuve	Cuivre	Anodes cuivre, déchets neufs	Conditions réductrices
Fût (Thomas)	Cuivre	Déchets de cuivre	Fusion, affinage au feu
Creusets chauffés (cuves indirectes)	Plomb, zinc	Déchets neufs	Fusion, affinage, alliage
Creusets à chauffage direct	Métaux précieux	Métal de première fusion	Fusion, alliage

Fours de fusion

Des procédés hydrométallurgiques sont également utilisés. Le métal contenu dans divers calcines, minerais et concentrés est dissous au moyen d'acides et d'alcalis (NaOH, et parfois Na_2CO_3) avant affinage et extraction électrolytique. Le matériau à lixivier se présente habituellement sous la forme d'un oxyde, soit un minerai oxydique, soit un oxyde obtenu par grillage. Une autre méthode est la lixiviation directe de certains concentrats ou mattes qui peut être réalisée sous pression élevée, ou à la pression atmosphérique. Certains minerais à base de sulfures de cuivre peuvent être lixiviés avec de l'acide sulfurique ou un autre agent, parfois des bactéries naturelles qui favorisent l'oxydation et la dissolution, mais ce dernier moyen nécessite des temps de séjour très longs.

De l'air, de l'oxygène, du chlore ou des solutions contenant du chlorure ferrique sont parfois ajoutés aux systèmes de lixiviation afin d'assurer les conditions appropriées pour la dissolution. Les solutions produites par la lixiviation subissent ensuite divers traitements destinés à affiner et extraire les métaux. La pratique habituelle consiste à renvoyer les solutions appauvries dans le circuit de lixiviation, sauf contre-indication, afin d'économiser les acides et les solutions alcalines.

4. Émissions et consommation actuelles

La gamme des matières premières est également un facteur important et a une influence sur la consommation d'énergie, sur les quantités de résidus produits et sur les quantités d'autres matériaux utilisés. Un exemple est l'élimination des impuretés telles que le fer, contenues dans le laitier ; c'est en effet la quantité d'impuretés présente dans la matière première qui détermine la quantité de laitier produit et la consommation d'énergie.

Les émissions dans l'environnement dépendent des systèmes de captage ou de dépollution utilisés. Le tableau suivant résume les plages actuelles d'émissions qui ont été communiquées pour un certain nombre de procédés de dépollution durant l'échange d'informations :

Technique de dépollution	Émissions déclarées			Émission spécifique (quantité par tonne de métal produite)
	Composé	Minimum	Maximum	
Filtre à manches, filtre électrostatique sur gaz chauds	Poussières (Métaux selon composition)	<1 mg/Nm ³	100 mg/Nm ³	100 – 6000 g/t
Filtre carboné	C total	< 20 mg/Nm ³		
Post-combustion (avec refroidissement rapide pour les dioxines)	C total	< 2m/Nm ³	100 mg/Nm ³	10-80 g/t
	Dioxines (TEQ)	< 0,1 ng/Nm ³	5 ng/Nm ³	5-10 µg/t
	HAP (EPA)	< 1 µg/Nm ³	2500 µg/Nm ³	
	HCN	< 0,1 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³	
Laveur humide ou semi-sec	SO ₂	<50 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³	500-3000 g/t
	Hydrocarbures	< 10 mgC/Nm ³	200 mgC/Nm ³	
	Chlore	< 2 mg/Nm ³		
Adsorption sur alumine	Poussières	< 1 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³	
	Hydrocarbures	< 1 mgC/Nm ³	50 mgC/Nm ³	
	HAP (EPA)	< 20 µg/Nm ³	2000 µg/Nm ³	
Récupération du chlore	Chlore	< 5 mg/Nm ³		
Optimisation de la combustion. Brûleur bas-NO _x	NO _x	10 mg/Nm ³	500 mg/Nm ³	
Épurateur à oxydation	NO _x		< 100 mg/Nm ³	
Unité de production d'acide sulfurique, valeurs déclarées en conversion de SO ₂	contact à double absorption	99,3%	99,7%	1 – 16 kg/t
	contact à simple absorption	95	99,1%	
Refroidissement, électrofiltre, adsorbeur chaud/charbon et filtre à manches	HAP (EPA)	0,1 mg/Nm ³	6 mg/Nm ³	
	Hydrocarbures	20 mgC/Nm ³	200 mgC/Nm ³	

Plages d'émissions actuelles déclarées

Les gaz de procédé sont captés puis épurés dans des filtres à manches pour réduire les émissions de poussières et de composés métalliques tels que ceux du plomb. Les tissus de filtre modernes apportent des améliorations significatives en matière d'efficacité, de fiabilité et de durée de vie. L'élimination des dioxines et des COV est assurée par des dispositifs de post-combustion et une absorption sur matériau carboné.

Cependant, les gaz non captés ou les émissions fugitives ne sont pas traités. Le stockage, les manutentions et les traitements préliminaires des matières premières produisent des émissions de poussières dans lesquelles les émissions fugitives tiennent une grande place. C'est aussi bien le cas des procédés de première ou de seconde élaboration car la part de ces émissions peut être beaucoup plus grande que celle des émissions captées et traitées. La conception des installations et l'exploitation du procédé doit être soignée pour capter et traiter les gaz de procédé où les émissions fugitives sont importantes.

Le tableau ci-après montre que les émissions fugitives ou non captées sont des problèmes importants :

	Émission de poussières kg/a	
	Avant captage secondaire supplémentaire des gaz (1992)	Après captage secondaire supplémentaire des gaz (1996)
Production d'anodes t/a	220 000	325 000
Émissions fugitives		
Total fonderie	66 490	32 200
En toiture	56 160	17 020
Émissions canalisées de première fusion		
Fonderie/unité d'acide	7 990	7 600
Cheminées hottes secondaires	2 547	2 116

Comparaison des charges de poussières dépolluées et fugitives dans une affinerie primaire de cuivre

Dans de nombreux procédés, les circulations d'eau de traitement et de refroidissement se font en circuit étanche mais le risque de rejets de métaux lourds dans l'eau subsiste. Les méthodes mises en œuvre pour réduire la consommation d'eau et la production d'eaux usées et pour dépolluer les eaux de process sont examinées au chapitre 2.

La production de résidus est également un important facteur dans cette industrie, toutefois, ces résidus contiennent souvent des métaux récupérables et leur traitement, sur place ou dans d'autres installations, pour en extraire les métaux est une pratique courante. Les laitiers produits sont souvent des déchets inertes, non lixiviables, et trouvent de nombreuses applications dans le secteur des travaux publics. D'autres laitiers comme les laitiers salés peuvent être traités pour récupérer des composés utilisables dans d'autres industries, mais l'industrie doit veiller à ce que ces opérations de récupération soient réalisées selon des normes environnementales rigoureuses.

5. Conclusions clé sur les MTD

L'échange d'informations qui a eu lieu durant la préparation du BREF relatif à la production des métaux non-ferreux a permis de formuler des conclusions quant aux MTD applicables aux procédés de production et aux procédés associés. Il convient donc de lire la section consacrée aux MTD dans chacun des chapitres pour avoir une connaissance complète de ces MTD, des procédés et des émissions associés. Les conclusions essentielles sont résumées ci-dessous.

• Activités en amont

La gestion du procédé, la supervision et le contrôle du procédé et des systèmes de dépollution sont des facteurs très importants. De bonnes pratiques de formation, l'instruction et la motivation de l'opérateur sont également nécessaires, en particulier pour empêcher la pollution environnementale. L'utilisation de techniques adaptées pour la manutention des matières premières peut éviter les émissions fugitives. D'autres techniques importantes comprennent :

- La prise en compte des implications environnementales d'un nouveau procédé ou d'une nouvelle matière première aux stades les plus précoces du projet, avec des révisions à intervalles réguliers par la suite ;
- La conception du procédé pour qu'il accepte les différents types de matières premières prévus. Des problèmes graves peuvent apparaître, par exemple, si les volumes de gaz sont trop élevés ou si l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal est plus importante que prévu. C'est dans la phase de conception qu'il est le plus avantageux, en rapport coût-efficacité, de chercher à améliorer les performances environnementales globales de l'installation ;
- L'utilisation d'une piste d'audit dans le processus de conception et de décision qui montrera comment divers procédés de fabrication et diverses options de réduction des émissions ont été envisagés ;
- La planification des procédures de mise en service dans le cas d'une installation nouvelle ou modifiée ;

Le tableau suivant résume les techniques applicables au stockage et à la manutention des matières premières en fonction du type et des caractéristiques du matériau.

Matière première	Groupe de métaux	Méthode de manutention	Méthode de stockage	Commentaires
Concentrés	Tous – si formation de poussières	Convoyeurs fermés ou manutention pneumatique	Bâtiment fermé	Prévention de la contamination de l'eau
	Tous – si aucune formation de poussières	Convoyeurs couverts	Sous abri	
Matériau à fine granulométrie (par exemple poudre métallique)	Métaux réfractaires	Convoyeurs fermés ou manutention pneumatique Convoyeurs couverts	Fûts, bennes et trémies fermés	Prévention de la contamination de l'eau et des émissions fugitives dans l'air
Matières premières secondaires	Tous – éléments de grande taille	Chargeur mécanique	Ouvert	Prévention de la contamination de l'eau ou des réactions avec l'eau. Drainage huileux provenant des copeaux
	Tous – éléments de petite taille	Benne de chargement	Hangars couverts	
	Tous – matériau à fine granulométrie	Enfermés ou agglomérés	Enfermés si pulvérulents	
Fondants	Tous – si formation de poussières	Convoyeurs fermés ou manutention pneumatique	Bâtiment fermé	Prévention de la contamination de l'eau
	Tous – si aucune formation de poussières	Convoyeurs couverts	Sous abri	
Combustibles solides et coke	Tous	Convoyeurs couverts si aucune formation de poussières	Sous abri si aucune formation de poussières	
Combustibles liquides et GPL	Tous	Conduite aérienne	Stockage certifié Zones fermées	Circuit de retour des conduites d'alimentation
Gaz de procédé	Tous	Conduite aérienne, conduite sous pression réduite (Chlore, CO)	Stockage certifié	Surveillance des pertes de charge. Alarmes pour les gaz toxiques
Solvants	Cu, Ni, groupe Zn, métaux précieux, carbone	Conduite aérienne Méthode manuelle	Fûts, réservoirs	Circuit de retour des conduites d'alimentation
Produits – cathodes, fil-machine, billettes, lingots, gâteaux, etc	Tous	En fonction des conditions	Stockage sur dalle béton à ciel ouvert ou stockage sous abri	Système de drainage approprié
Résidus du procédé à récupérer	Tous	En fonction des conditions	À ciel ouvert, à l'abri, enfermé, en fonction de la formation de poussières et de la réaction avec l'eau	Système de drainage approprié
Déchets à envoyer en décharge (par exemple garnissages des fours)	Tous	En fonction des conditions	À ciel ouvert, à l'abri, sous hangars fermés ou hermétiquement fermés (fûts) en fonction du matériau	Système de drainage approprié

Résumé des techniques de manutention et de stockage des matières premières

La conception du four, l'utilisation des procédés de prétraitement appropriés et le contrôle du procédé ont été identifiés comme étant des caractéristiques importantes des MTD.

L'utilisation d'un mélange de matières premières pour optimiser le procédé évite d'utiliser un matériau inapproprié et maximise l'efficacité du procédé. L'échantillonnage et l'analyse des matières chargées et la ségrégation de certains matériaux sont des facteurs importants dans cette technique.

Une bonne conception, l'entretien et le contrôle sont essentiels pour toutes les étapes du procédé et du système de dépollution. L'échantillonnage et la surveillance des émissions dans l'environnement doivent être réalisés selon les méthodes régies par les normes nationales ou internationales. On doit contrôler les paramètres importants pouvant être utilisés pour le contrôle du procédé ou du système de dépollution. Il convient d'effectuer dans la mesure du possible la surveillance continue des paramètres clé.

• Régulation du procédé

Les techniques de régulation des procédés qui permettent de mesurer et de maintenir des paramètres optimum tels que la température, la pression, les composés gazeux et d'autres paramètres process critiques, etc. sont considérées comme faisant partie des MTD.

Les prélèvements et analyses des matières premières permettent de contrôler les conditions de fonctionnement de l'installation. Un bon mélange des charges permet d'obtenir un rendement de conversion optimal et de réduire les émissions et les rejets.

L'utilisation de systèmes de pesage et de dosage ainsi que l'utilisation de microprocesseurs pour contrôler la vitesse d'alimentation des matériaux, les grandeurs critiques du procédé et les conditions de combustion et les ajouts de gaz permettent d'optimiser le fonctionnement du procédé. Ces régulations peuvent faire appel à plusieurs paramètres et ceux-ci doivent donc être mesurés, avec des seuils d'alarme prévus sur les paramètres critiques. Ces dispositions comprennent :

- la surveillance en ligne de la température, de la pression (ou de la dépression) dans les fours et des volumes ou débits de gaz ;
- la surveillance des composés gazeux (O_2 , SO_2 , CO , poussières, NO_x , etc.) ;
- la surveillance en ligne des vibrations afin de détecter les colmatages et les défaillances éventuelles des équipements ;
- la surveillance en ligne du courant et de la tension dans les procédés électrolytiques ;
- la surveillance en ligne des émissions afin de réguler les paramètres critiques du procédé ;
- la surveillance et la régulation de la température des fours de fusion afin d'empêcher la formation de vapeurs des métaux et des oxydes métalliques par surchauffe.

Il conviendra de prévoir pour les opérateurs, ingénieurs et autres personnels un programme continu de formation et d'évaluation qui concernera l'application des instructions opératoires, l'utilisation des techniques de contrôle modernes, la signification des alarmes et les mesures à prendre lors du déclenchement des alarmes.

L'optimisation des niveaux de supervision permettra de tirer le meilleur profit de ces dispositions et de maintenir la responsabilité des opérateurs.

• Captage et dépollution des gaz

Les systèmes de captage des fumées des fours ou des réacteurs doivent mettre à profit les systèmes d'étanchéité de ces appareils et être conçus pour maintenir une légère dépression afin d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Il conviendra d'utiliser les systèmes de captage qui ne compromettent pas l'étanchéité des fours ni le déploiement des hottes sur les fours. On peut donner comme exemples les ajouts de matériau à travers les électrodes, les ajouts via les tuyères ou les lances et l'utilisation de soupapes rotatives robustes sur les dispositifs d'alimentation. Le captage secondaire des gaz est coûteuse et consomme beaucoup d'énergie mais elle est nécessaire sur certains fours. Le système utilisé doit être un système intelligent capable de cibler l'extraction sur la source et sur la durée de toute émanation.

Dans l'ensemble, pour l'élimination des poussières et des métaux associés, ce sont les filtres à manches (placés en aval de la récupération de chaleur ou du refroidissement des gaz) qui fourniront les meilleurs résultats, sous réserve que des tissus modernes résistants à l'usure soient utilisés, que les particules se prêtent à cette méthode de captage et que le filtre soit équipé d'un système de surveillance continue permettant de détecter les anomalies de fonctionnement. Les tissus filtrants modernes (par exemple les filtres à membrane) apportent des améliorations significatives en matière d'efficacité, de fiabilité et de longévité et sont donc générateurs d'économies de coûts à moyen terme. Ils peuvent être utilisés dans les installations existantes et peuvent être montés lors de l'entretien. Ils comprennent des systèmes de détection de rupture de sac et des dispositifs de nettoyage en ligne.

Pour les poussières collantes ou abrasives, les filtres électrostatiques humides ou les laveurs peuvent être efficaces à condition d'avoir été convenablement conçus pour l'application.

Le traitement des gaz dans la phase de première fusion ou d'incinération doit comporter une étape d'élimination du dioxyde de soufre et/ou de post-combustion si ceci est jugé nécessaire pour éviter les problèmes de qualité de l'air à l'échelle locale, régionale ou à longue distance ou si des dioxines peuvent être présentes.

Enfin, les variations dans les caractéristiques des matières premières influent sur la gamme des composés ou sur l'état physique de certains composés, par exemple la taille et les propriétés physiques des poussières produites. Ces aspects doivent être évalués localement.

• **Prévention et destruction des dioxines**

La présence de dioxines ou leur formation durant les procédés est un aspect qu'il conviendra de prendre en compte dans de nombreux procédés pyrométallurgiques utilisés pour la production des métaux non-ferreux. Des cas concrets sont donnés dans les chapitres spécifiques aux métaux et, pour ces cas, les techniques suivantes sont considérées comme étant les MTD pour prévenir la formation de dioxines et détruire les dioxines présentes. Ces techniques peuvent être combinées entre elles. Il semble que certains métaux non-ferreux peuvent catalyser la synthèse de novo et il sera donc parfois nécessaire de disposer d'un gaz propre avant de continuer la dépollution.

- Contrôle de la qualité des matières premières secondaires, en fonction du procédé utilisé. Alimentation des matériaux appropriés pour le four ou le procédé utilisé. La sélection et le tri pour éviter l'introduction de mat contaminées par des matières organiques ou des précurseurs peut réduire le potentiel de formation des dioxines.
- Utilisation d'une post-combustion convenablement conçue et mise en œuvre et refroidissement rapide des gaz chauds à $< 250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Utilisation de conditions de combustion optimales. À cette fin, on prévoira si nécessaire une injection d'oxygène dans la partie supérieure du four pour parachever la combustion des gaz ;
- Absorption sur charbon actif dans un réacteur à lit fixe ou à lit mobile ou par injection dans le flux des gaz et élimination en tant que poussières sous filtre ;
- Dépoussiérage à très haute efficacité, par exemple filtres en céramique, filtres à manches haute efficacité ou train épurateur de gaz placé en amont d'une unité d'acide sulfurique ;
- Utilisation d'une étape d'oxydation catalytique ou utilisation de filtres à manches comportant un revêtement catalytique ;
- Poussières captées traitées dans les fours à haute température afin de détruire les dioxines et de récupérer les métaux présents.

Les concentrations des émissions associées aux techniques ci-dessus se situent entre $<0,1$ et $0,5\text{ ng/Nm}^3$ TEQ, en fonction des matières chargées, du procédé de première fusion ou de seconde fusion et des techniques ou combinaison de techniques utilisées pour l'élimination des dioxines.

• **Procédés métallurgiques**

Le choix des matières premières dont peuvent disposer les différentes installations est large, ce qui signifie qu'il est nécessaire d'inclure une grande variété de procédés de production métallurgique dans les sections MTD dans la majorité des groupes de métaux. Très souvent, le choix du procédé est dicté par les matières premières, de sorte que le type de four n'entre que pour une part mineure dans la détermination des MTD, à condition que le four ait été conçu pour les matières premières utilisées et qu'il comporte une récupération d'énergie lorsque les conditions le permettent.

Il existe toutefois des exceptions. Par exemple, l'utilisation de cuves à anodes précuites avec piquage et alimentation en alumine multipoints au centre de la cuve a été identifiée comme une MTD pour l'aluminium primaire, de même qu'est classée MTD, dans la production de certains ferroalliages, l'utilisation de fours étanches qui permet de capter des gaz à grand pouvoir calorifique.

Pour le cuivre de première fusion, le four réverbère n'est pas considéré comme étant une MTD. Les autres facteurs majeurs sont le dosage des matières premières, le contrôle du procédé, la gestion et le captage des fumées. La hiérarchie dans le choix d'un procédé nouveau ou procédé modifié a été identifiée de la manière suivante :

- Le prétraitement thermique ou mécanique des matières secondaires afin de minimiser la contamination organique de la charge ;
- L'utilisation des fours étanches ou d'autres unités de process, qui permettent d'éviter les émissions fugitives, de récupérer la chaleur et de capter les gaz de procédé pour valorisation (par exemple l'utilisation du CO en tant que combustible et du SO₂ en tant qu'acide sulfurique) ou pour dépollution ;
- L'utilisation de fours semi-étanches lorsque des fours étanches ne sont pas disponibles ;
- La minimisation des transferts de matériau entre les procédés ;
- Lorsque ces transferts sont inévitables, les chenaux d'alimentation des fours sont préférés aux louches pour les matériaux en fusion ;
- Dans certains cas, la restriction des techniques à celles qui évitent les transferts de matériau en fusion peut empêcher la récupération de certaines matières secondaires qui entreraient alors dans le circuit des déchets. Dans ces cas, l'utilisation de traitement de fumées secondaires ou tertiaires est appropriée pour pouvoir récupérer ces matériaux ;
- La conception de hottes et de gaines prévues pour capter les fumées qui émanent des transferts et des coulées de métal, de mattes ou de laitiers ;
- Des enceintes autour des fours ou des réacteurs seront parfois indispensables pour éviter les rejets de fumées perdues dans l'atmosphère ;
- Si on juge qu'une enceinte et une extraction primaire seront inefficaces, le four peut être entièrement fermé et l'air de ventilation aspiré par des ventilateurs d'extraction et dirigé vers un système adapté de traitement et de rejet ;
- L'utilisation maximale du contenu énergétique des concentrés sulfurés.

• Émissions dans l'air

Les émissions dans l'air proviennent des étapes de stockage, de manutention, de prétraitement, de pyrometallurgie et d'hydrometallurgie. Les transferts de matériaux occupent une place particulièrement importante. Les données fournies ont confirmé que la part des émissions fugitives est très grande dans de nombreux procédés et que ces émissions peuvent être beaucoup plus importantes que celles qui sont captées et traitées. Dans ces cas, il est possible de réduire l'impact sur l'environnement en suivant la hiérarchie des techniques de captage des gaz émanant des stockages et manutentions de matériaux, des réacteurs ou des fours et des points de transfert de matériau. Les émissions fugitives potentielles doivent être prises en compte à toutes les étapes de la conception et du développement du procédé. La hiérarchie de captage pour les gaz émis dans chacune des étapes du procédé est la suivante :

- optimisation du procédé et minimisation des émissions,
- réacteurs et fours étanches,
- captage ciblé des fumées.

Le captage des fumées en toiture d'atelier est très consommateur d'énergie et doit être utilisé en dernier recours.

Les sources potentielles des rejets dans l'air sont récapitulées dans le tableau suivant qui présente également les méthodes de prévention et de traitement. Les rejets dans l'air sont reportés sur la base des émissions captées. Les valeurs des émissions associées sont des moyennes journalières établies sur la base d'une mesure continue sur la période de fonctionnement. Lorsqu'une mesure en continu n'est pas réalisable, la valeur indiquée est la moyenne sur la période de prélèvement. Les valeurs sont données en conditions normalisées : 273 K, 101,3 kPa, teneur en oxygène mesurée et gaz secs, sans dilution des gaz.

Le captage du soufre est une exigence essentielle lorsque des minerais ou des concentrés sulfurés sont traités par grillage ou fusion. Le dioxyde de soufre produit par le procédé est capté et peut être récupéré sous la forme de soufre, de gypse (s'il n'y a pas d'effets croisés) ou de dioxyde de soufre ou encore transformé en acide sulfurique. Le choix du procédé dépend de l'existence de marchés locaux pour le dioxyde de soufre. Les deux filières de production d'acide sulfurique, à savoir dans une unité

de contact à double absorption avec un minimum de quatre passes ou dans une unité de contact à simple absorption avec production de gypse à partir des gaz de queue avec utilisation d'un catalyseur moderne, sont considérées comme des MTD. La configuration de l'unité dépendra de la concentration du dioxyde de soufre produit lors de l'étape de grillage ou de fusion.

Phase du procédé	Composé présent dans les effluents gazeux	Méthode de traitement
Manutention et stockage des matériaux	Poussières et métaux	Stockage, manutention et transfert corrects. Captage de poussières et filtre à manches si nécessaire
Broyage, séchage	Poussières et métaux	Exploitation du procédé. Captage des gaz et filtre à manches
Frittage/grillage Première fusion Conversion Affinage au feu	COV, dioxines	Post-combustion, ajout d'un adsorbant ou de charbon actif
	Poussières et composés métalliques	Captage des gaz, épuration des gaz dans le filtre à manches, récupération de chaleur
	Monoxyde de carbone	Post-combustion si nécessaire
	Dioxyde de soufre	Unité d'acide sulfurique (pour minerais sulfurés) ou laveur
Traitement du laitier	Poussières et métaux	Captage des gaz, refroidissement et filtre à manches
	Dioxyde de soufre	Laveur
	Monoxyde de carbone	Post-combustion
Lixiviation et affinage chimique	Chlore	Captage des gaz et réutilisation, laveur chimique par voie humide
Affinage au carbonyle	Monoxyde de carbone Hydrogène	Procédé étanche, récupération et réutilisation Post-combustion et dépoussiérage du filtre à manches pour les gaz résiduels
Extraction par solvant	COV (en fonction du solvant utilisé et à déterminer localement pour évaluer le risque possible)	Confinement, captage des gaz, récupération de solvant. Adsorption sur matériau carboné, si nécessaire.
Affinage thermique	Poussières et métaux	Captage des gaz et filtre à manches
	Dioxyde de soufre	Laveur si nécessaire
Électrolyse en bain de sels fondus	Fluorures, chlore, PFC	Réalisation du procédé. Captage des gaz, adsorption sur alumine et filtre à manches
Graphitisation, cuisson d'électrodes	Poussières, métaux, SO ₂ , fluorures, HAP, goudrons	Captage des gaz, condensation et filtres électrostatiques, post-combustion ou adsorption sur alumine et filtre à manches. Laveur si nécessaire pour SO ₂
Production de poudres métalliques	Poussières et métaux	Captage des gaz et filtre à manches
Production des poudres	Poussières, ammoniac	Captage des gaz et récupération. Laveur à milieu acide
Réduction à haute température	Hydrogène	Procédé étanche, réutilisation
Extraction électrolytique	Chlore Brouillard acide	Captage des gaz et réutilisation. Laveur. Dévésiculeur
Fusion et coulée	Poussières et métaux	Captage des gaz et filtre à manches
	COV, dioxines (charge organique)	Post-combustion (injection de carbone)
Note : Le dépoussiérage par filtre à manches peut nécessiter l'élimination des particules chaudes afin de prévenir les risques d'incendie. Les filtres électrostatiques à haute température seront utilisés dans un système d'épuration des gaz en amont d'une unité d'acide sulfurique ou pour les gaz humides.		

Résumé des sources et des options de traitement/réduction

Un résumé des niveaux d'émission associés aux systèmes de dépollution considérés comme faisant partie des MTD pour les procédés métallurgiques des non-ferreux est présenté dans le tableau suivant. Pour de plus amples détails, se reporter aux conclusions sur les MTD données dans les chapitres spécifiques aux différents métaux.

Technique de traitement	Plage associée	Commentaires
Filtre à manches	Poussières 1 – 5 mg/Nm ³ Métaux – en fonction de la composition des poussières	En fonction des caractéristiques des poussières
Carbone ou biofiltre	C organique total < 20 mg/ Nm ³	Phénol < 0,1 mg/Nm ³
Post-combustion (avec refroidissement rapide pour l'élimination des dioxines)	C organique total < 5 – 15 mg/ Nm ³ Dioxine < 0,1 – 0,5 ng/Nm ³ TEQ HAP (OSPAR11) < 200 µgC Nm ³ HCN < 2 mg/ Nm ³	Conçue pour le volume de gaz. Il existe d'autres techniques pour une réduction plus poussée des dioxines par injection de carbone/chaux, réacteurs/filtres catalytiques
Conditions de combustion optimisées	C organique total < 5 – 50 mg/ Nm ³	
Filtre électrostatique humide Filtre céramique	Poussières < 5 mg/ Nm ³	En fonction des caractéristiques par exemple, des poussières, de l'humidité ou des hautes températures
Laveur basique humide ou semi-sec	SO ₂ < 50 – 200 mg/Nm ³ Goudrons < 10 mg/Nm ³ Chlore < 2 mg/Nm ³	
Epuration voie sèche à l'alumine	Poussières 1 – 5 mg/Nm ³ Hydrocarbures < 2 mg/Nm ³ HAP (OSPAR11) < 200 µgC/ Nm ³	
Récupération de chlore	Chlore < 5 mg/Nm ³	Le chlore est réutilisé. Possibilité de rejets fugitifs accidentels
Epuration par oxydant	NO _x < 100 mg/Nm ³	Provenant de l'utilisation de la récupération d'acide nitrique suivi par l'élimination des traces
Brûleur bas NO _x	< 100 mg/Nm ³	Des valeurs plus élevées sont associées à l'enrichissement en oxygène afin de réduire l'utilisation d'énergie – Dans ce cas, les émissions sont réduites en volume et en masse
Oxycombustion	< 100 – 300 mg/Nm ³	
Unité d'acide sulfurique	Conversion > 99,7% (contact à double absorption)	Comprend un épurateur de mercure du type Boliden/Norzink ou au thiosulphate. Hg : < 1 ppm dans l'acide produit
	Conversion > 99,1% (contact à simple absorption)	
Refroidisseur, filtre électrostatique, adsorption sur chaux/carbone et filtre à manches	HAP (OSPAR11) < 200 µC/ Nm ³ Hydrocarbures (volatils) < 20 mgC/ Nm ³ Hydrocarbures (condensés) < 2 mgC/Nm ³	
Note : Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en valeurs moyennes journalières en fonction de la surveillance continue pendant la période de fonctionnement et des conditions normalisées de 273 K, 101,3 kPa, de la teneur en oxygène mesurée et des gaz secs, sans dilution des gaz avec l'air. Dans les cas où on ne peut pas effectuer de surveillance continue, la valeur donnée est la moyenne sur la période de prélèvement. En ce qui concerne le système de dépollution utilisé, il conviendra de prendre en compte les caractéristiques des gaz et des poussières dans sa conception et dans la détermination des températures opératoires. Pour certains composés, la variation des concentrations dans les gaz bruts en procédés discontinus peut affecter la performance du système de dépollution.		

Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

De nombreux réactifs spécifiques sont utilisés dans le traitement chimique de métaux mis en solution ou dans divers procédés métallurgiques. Certains composés, sources et méthodes de traitement des gaz produits par l'utilisation de ces réactifs sont repris dans le tableau ci-dessous :

Procédé/réactif utilisé	Composé présent dans les effluents gazeux	Méthode de traitement
Utilisation d'oxyde d'arsenic ou d'antimoine (affinage de Zn/Pb)	Arsine/stibine	Épuration au permanganate
Brai, etc.	Goudrons et HAP	Post-combustion, condenseur et filtre électrostatique ou traitement sec.
Solvants, COV	COV, odeurs	Confinement, condensation. Charbon actif, biofiltre.
Acide sulfurique (+ soufre présent dans les combustibles ou les matières premières)	Dioxyde de soufre	Système de traitement par voie humide ou semi-sèche. Unité d'acide sulfurique.
Eau régale	NOCl, NO _x	Système de lavage à la soude
Chlore, HCl	Cl ₂	Système de lavage à la soude
Acide nitrique	NO _x	Oxydation et absorption, recyclage, système de lavage.
Na ou KCN	HCN	Oxydation avec peroxyde d'hydrogène ou hypochlorite.
Ammoniac	NH ₃	Récupération, système de lavage
Chlorure d'ammonium	Aérosol	Récupération par sublimation, système de lavage
Hydrazine	N ₂ H ₄ (cancérigène potentiel)	Épuration par lavage ou charbon actif
Borohydrure de sodium	Hydrogène (risque d'explosion)	À éviter si possible dans le traitement des métaux du groupe platine (en particulier Os, Ru)
Acide formique	Formaldéhyde	Système de lavage à la soude
Chlorate de sodium /HCl	Oxydes de Cl ₂ (risque d'explosion)	Contrôle du point final du procédé

Vue d'ensemble des méthodes de traitement chimique pour certains composés gazeux

• Émissions dans l'eau

Les émissions dans l'eau proviennent de sources diverses et il existe de nombreuses options de minimisation et de traitement applicables en fonction de la source des émissions et des composés présents. En général, les eaux usées peuvent contenir des composés métalliques solubles et non solubles, des huiles et des matières organiques. Les procédés de traitement et de minimisation potentiels des eaux usées et des métaux produits sont récapitulés dans le tableau suivant :

Source des eaux usées	Procédé associé	Méthodes de minimisation	Méthodes de traitement
Eau de traitement	Production d'alumine Casse des batteries au plomb Décapage	Retour au procédé autant que possible	Neutralisation et précipitation. Électrolyse
Eau de refroidissement indirect	Refroidissement du four pour la plupart des métaux. Refroidissement de l'électrolyte pour le Zn	Utilisation d'un système de refroidissement étanche ou par air. Système de surveillance pour détecter les fuites	Décantation
Eau de refroidissement direct	Pièces moulées de Al, Cu, Zn Electrodes en carbone	Décantation Système de refroidissement fermé	Décantation. Précipitation si nécessaire
Granulation du laitier	Cu, Ni, Pb, Zn, métaux précieux, ferroalliages		Décantation. Précipitation si nécessaire
Électrolyse	Cu, Ni, Zn	Système étanche Extraction électrolytique sur les trop-pleins d'électrolyte	Neutralisation et précipitation
Hydrométallurgie (purge sous pression)	Zn, Cd	Système étanche	Décantation. Précipitation si nécessaire
Système de dépollution (purge sous pression)	Laveurs humides. Electrofiltres humides et laveurs pour unités d'acides	Réutilisation des flux d'acides faibles si possible	Décantation. Précipitation si nécessaire.
Eau de surface	Tous	Bon stockage des matières premières et prévention des émissions fugitives	Décantation. Précipitation si nécessaire. Filtration

Vue d'ensemble des MTD pour les flux d'eaux usées

Les systèmes de traitement des eaux usées peuvent maximiser l'élimination des métaux s'ils utilisent la sédimentation et au besoin la filtration. Les réactifs utilisés pour la précipitation peuvent être des hydroxydes, des sulfures ou une combinaison des deux, en fonction du mélange des métaux présents. Il est également possible, dans de nombreux cas, de réutiliser l'eau traitée.

	Principaux composés [mg/l]					
	Cu	Pb	As	Ni	Cd	Zn
Eau de traitement	< 0,1	< 0,05	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,15
Note : Les émissions associées dans l'eau sont basées sur un échantillon aléatoire vérifié ou sur un échantillon composite sur 24 heures. L'importance du traitement des eaux usées dépend de la source et des métaux présents dans les eaux usées.						

Exemple d'émissions dans l'eau associées à l'utilisation des MTD

• Résidus du procédé

Des résidus sont produits à différents stades des procédés et dépendent dans une très grande mesure des composés présents dans les matières premières. Les minerais et les concentrés contiennent diverses quantités de métaux autres que le métal cible prioritaire. Les procédés sont conçus pour obtenir le métal cible à l'état pur et récupérer dans le même temps d'autres métaux intéressants.

Ces autres métaux ont tendance à se concentrer dans les résidus des procédés qui forment eux-mêmes la matière première d'autres procédés de récupération de métaux. Le tableau ci-dessous donne une vue d'ensemble de certains résidus de production et des options de traitement disponibles.

Source des résidus	Métaux associés	Résidus	Options de traitement
Manutention des matières premières	Tous les métaux	Poussières, balayures	Réintroduction dans le procédé principal
Four de première fusion	Tous les métaux	Laitier	Matériaux de construction après traitement du laitier. Industrie des abrasifs. Certaines parties du laitier peuvent être utilisées comme matériaux réfractaires, par ex. le laitier de la production de chrome.
	Ferroalliages	Laitier riche	Matière première pour d'autres procédés d'élaboration de ferroalliages.
Four de conversion	Cu	Laitier	Recyclage dans le four de fusion
Four d'affinage	Cu	Laitier	Recyclage dans le four de fusion
	Pb	Résidus d'écémage	Récupération d'autres métaux de valeur
	Métaux précieux (PM)	Résidus d'écémage et laitier	Recyclage interne
Traitement du laitier	Cu et Ni	Laitier purifié	Matériaux de construction. Matte produite
Four de seconde fusion	Tous les métaux	Résidus d'écémage, laitier et laitier salin	Réintroduction dans le procédé après traitement. Récupération des métaux, récupération des sels et autres matériaux
Affinage électrolytique	Cu	Trop-plein d'électrolyte Restes d'anodes Boues anodiques	Récupération de Ni. Retour au convertisseur Récupération des métaux précieux
Extraction électrolytique	Zn, Ni, Co, métaux précieux	Électrolyte utilisé	Réutilisation en procédé de lixiviation
Électrolyse en bain de sels fondus	Al	Garnissage de cuve usé Excédent du bain Mégots d'anodes	Combustible ou mise en décharge Vente en tant qu'électrolyte Récupération
	Na et Li	Matériau de la cuve	Ferraille après épuration
Distillation	Hg	Résidus (hollines)	Réutilisation en tant qu'alimentation du procédé
	Zn, Cd	Résidus	Retour au procédé
Lixiviation	Zn	Résidus de ferrite	Mise en décharge sûre, réutilisation de la solution
	Cu	Résidus	Mise en décharge sûre
	Ni/Co	Résidus de Cu/Fe	Récupération, mise en décharge
Unité d'acide sulfurique		Catalyseur	Régénération
		Boues acides	mise en décharge sûre
		Acide faible	Lixiviation, mise en décharge
Garnissages de four	Tous les métaux	Réfractaires	Utilisation comme agent laitier, mise en décharge
Fraisage, meulage	Carbone	Poussières de carbone et de graphite	Utilisation en tant que matière première dans d'autres procédés
Décapage	Cu, Ti	Acide usé	Récupération
Systèmes de dépollution par voie sèche	La plupart – par filtres à manches ou filtres électrostatiques	Poussières sous filtre	Retour au procédé Récupération d'autres métaux
Systèmes de dépollution par voie humide	La plupart – par laveurs ou filtres électrostatiques humides	Boue de filtre	Retour au procédé ou récupération d'autres métaux (par exemple Hg). mise en décharge
Boue de traitement des eaux usées	La plupart	Boues d'hydroxyde ou de sulfure	mise en décharge sûre, réutilisation. Réutilisation
Digestion	Alumine	Boues rouges	mise en décharge sûre, réutilisation des solutions

Vue d'ensemble des résidus et des options pour leur traitement

Les poussières des filtres peuvent être recyclées sur place ou bien valorisées en externe soit pour la récupération d'autres métaux dans des installations de production de métaux non-ferreux exploitées par des tiers, soit dans d'autres applications.

Des traitements peuvent être appliqués aux résidus et scories pour récupérer les métaux intéressants qu'ils recèlent et les rendre aptes à d'autres usages, par exemple comme matériaux de construction. Certains composés peuvent être transformés en produits commercialisables.

Les résidus de traitement des eaux peuvent contenir des métaux intéressants et être recyclés dans certains cas.

Le législateur et l'exploitant doivent s'assurer que la récupération des résidus par des tiers est effectuée dans le respect de normes environnementales strictes et ne provoque par d'effets croisés.

- **Composés toxiques**

La toxicité spécifique de certains composés susceptibles d'être émis (ainsi que leur impact environnemental ou autres conséquences) varie d'un groupe à l'autre. Les procédés d'obtention de certains métaux produisent des composés toxiques qui devront donc être réduits.

- **Récupération d'énergie**

La récupération d'énergie avant ou après la dépollution est applicable dans la majorité des cas, toutefois les conditions locales comptent beaucoup par exemple s'il n'y a pas de sortie pour l'énergie récupérée. Les conclusions retenues en ce qui concerne les MTD en matière de récupération d'énergie sont les suivantes :

- Production de vapeur et d'électricité à partir de la chaleur des chaudières de récupération ;
- Utilisation de la chaleur de réaction pour la fusion ou le grillage de concentrés ou pour la fusion de vieux métaux dans un convertisseur ;
- Utilisation des gaz chauds du procédé pour sécher les matières chargées ;
- Préchauffage de la charge des fours en utilisant le contenu énergétique des gaz de four ou des gaz chauds d'une autre source ;
- Utilisation de brûleurs régénératifs ou préchauffage de l'air de combustion ;
- Utilisation du CO produit comme combustible ;
- Chauffage des solutions de lixiviation en utilisant la chaleur des gaz de procédé chauds ou des solutions chaudes ;
- Utilisation comme combustible des plastiques contenus dans certaines matières premières à condition que les plastiques de bonne qualité ne puissent pas être récupérés et que la combustion des plastiques ne provoque pas l'émission de COV ni de dioxines ;
- Utilisation de réfractaires légers, sauf indication contraire.

6. Degré de consensus et recommandations pour les futurs travaux

Le présent BREF a reçu un large soutien de la part du groupe de travail technique et des participants à la 7e réunion du Forum d'Echange d'Informations. Les critiques ont principalement porté sur des lacunes au niveau de l'information et sur des questions de présentation (demandes pour l'incorporation dans le Résumé d'un plus grand nombre de niveaux d'émissions et de consommations liés aux MTD).

Il est recommandé que ce document soit révisé dans 4 ans. Les domaines dans lesquels il conviendra de poursuivre les efforts pour pouvoir établir une base d'informations solide sont, avant tout, les émissions fugitives, et aussi les données d'émissions et de consommations spécifiques, les résidus de procédé, les eaux usées et les aspects touchant les petites et moyennes entreprises. Le chapitre 13 comprend d'autres recommandations.

PREFACE

1. Statut du document

Sauf indication contraire, les références à « la directive » faites dans le présent document renvoient à la directive du conseil 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution. Le présent document fait partie d'une série de documents qui présentent les résultats d'un échange d'informations entre les Etats membres de l'UE et des industries intéressées au sujet des meilleures techniques disponibles (MTD), des développements et la surveillance associée à ceux-ci. Il est publié par la Commission Européenne en application de l'article 16 (2) de la directive et doit donc être pris en considération, conformément à l'annexe IV de la directive lors de la détermination des « meilleures techniques disponibles ».

2. Obligations légales prévues par la directive IPPC et la définition des MTD

Afin de clarifier le contexte juridique entourant la rédaction du présent document, cette préface décrit quelques unes des principales dispositions de la directive IPPC y compris la définition du terme « meilleures techniques disponibles ». Cette description ne peut évidemment pas être complète et est donnée à titre purement informatif. Elle n'a aucune valeur juridique et n'a pas pour effet de modifier les dispositions réelles de la directive.

Le but de la directive est d'atteindre la prévention et la réduction intégrées des dispositions en provenance des activités énumérées dans son annexe I afin de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble. La base juridique de cette directive concerne la protection environnementale. Lors de sa mise en œuvre, il conviendra de tenir également compte d'autres objectifs communautaires tels que la compétitivité de l'industrie communautaire, ce qui permettra de contribuer au développement durable.

Plus spécifiquement, elle prévoit un système d'autorisation pour certaines catégories d'installations industrielles, en vertu duquel les exploitants et régulateurs sont invités à adopter une approche globale intégrée en ce qui concerne les risques de pollution et le potentiel de consommation associés à l'installation. L'objectif global de cette approche intégrée doit être d'améliorer la gestion et le contrôle des procédés industriels afin de parvenir à un niveau de protection élevé pour l'environnement dans son ensemble. Le noyau dur de cette approche est le principe général défini à l'article 3 qui stipule que les exploitants doivent prendre toutes les mesures de prévention appropriées contre la pollution, notamment en mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles afin d'améliorer leurs performances en matière d'environnement.

Le terme « meilleures techniques disponibles » est défini à l'article 2 (11) de la directive comme étant « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique des techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émissions visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. » L'article 2 (11) précise ensuite cette définition de la manière suivante :

Les « techniques » désignent aussi bien les techniques utilisées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt ;

Les techniques « disponibles » correspondent aux techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer au secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou pas sur le territoire de l'Etat membre en question, tant qu'elles sont raisonnablement accessibles pour l'opérateur ;

« Meilleures » désigne les plus efficaces pour atteindre le niveau de protection général élevé de l'environnement dans son ensemble.

En outre, l'annexe IV de la directive contient une liste de « considérations à prendre en compte en général ou dans des cas particuliers lors de la détermination des meilleures techniques disponibles... compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une mesure, et des principes de précaution et de prévention ».

Ces considérations comprennent les informations publiées par la Commission en vertu de l'article 16 (2).

Les autorités compétentes chargées de délivrer les autorisations sont invitées à tenir compte des principes généraux définis à l'article 3 lors de la détermination des conditions de l'autorisation. Ces conditions doivent comporter des valeurs limites d'émission, qui peuvent être complétées ou remplacées, le cas échéant, par des paramètres ou des mesures techniques équivalents. Conformément à l'article 9 (4) de la directive, ces valeurs limites d'émission, paramètres et mesures techniques équivalents doivent, sans préjudice du respect des normes sur la qualité de l'environnement, reposer sur les meilleures techniques disponibles, sans prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, mais en tenant compte des caractéristiques techniques de l'installation concernée, de son implantation géographique et des conditions locales de l'environnement. Dans tous les cas, les conditions d'autorisation doivent prévoir des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontières et garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En vertu de l'article 11 de la directive, les Etats membres ont l'obligation de veiller à ce que les autorités compétentes se tiennent informées ou soient informées de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

3. Objectif du document

L'article 16 (2) de la directive exige de la commission qu'elle organise « un échange d'informations entre les Etats membres et les industries concernés au sujet des meilleures techniques disponibles, des la surveillance et leur développement associé » et publie les résultats des échanges d'informations.

Le but de l'échange d'informations est défini à l'annexe 25 de la directive qui prévoit que « le développement et les échanges d'informations au niveau communautaire en ce qui concerne les meilleures techniques disponibles permettront de réduire les déséquilibres au plan technologique dans la communauté, favoriseront la diffusion au plan mondial des valeurs limites et des techniques utilisées dans la communauté et aideront les Etats membres dans la mise en œuvre efficace de la présente directive ».

La Commission (DG Environment) a mis en place un forum d'échanges d'informations (IEF) pour faciliter les travaux entrepris en application de l'article 16 (2) et un certain nombre de groupes de travail techniques ont été créés sous les auspices de l'IEF. L'IEF tout comme les groupes de travail techniques sont composés des représentants des Etats membres et de l'industrie, comme le prévoit l'article 16 (2).

La présente série de documents a pour but de refléter précisément l'échange d'informations qui a été établi conformément à l'article 16 (2) et de fournir des informations de référence à l'instance chargée de la délivrance des autorisations pour qu'elle les prenne en compte lors de la définition des conditions d'autorisation. En rendant disponibles les informations pertinentes relatives aux meilleures techniques disponibles, ces documents doivent devenir des outils précieux pour l'amélioration des performances en matière d'environnement.

4. Sources d'informations

Le présent document est le résumé des informations recueillies à partir d'un certain nombre de sources, y compris notamment l'expertise des groupes mis en place pour assister la Commission dans son travail, puis vérifiées par les services de la Commission. Il convient de remercier ici les auteurs de toutes ces contributions.

5. Comment comprendre et utiliser le présent document

Les informations contenues dans le présent document sont prévues pour servir de base à la détermination des MTD dans certains cas particuliers. Lors de la détermination de ces MTD et de la fixation des conditions d'autorisation fondée sur les MTD, l'objectif global, qui est de parvenir à un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble, ne doit jamais être perdu de vue.

Le reste de cette section décrit le type d'information présenté dans chacune des sections du document.

Le Chapitre 1 fournit des informations générales sur le secteur industriel concerné. Le Chapitre 2 donne des informations sur les procédés industriels, les systèmes de dépollution et les techniques générales communs qui sont utilisés dans ce secteur. Les Chapitres 3 à 12 présentent les procédés mis en œuvre, les niveaux actuels d'émissions et de consommations, les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD, les techniques qui sont considérées comme étant les MTD et les techniques émergentes se rapportant à chacun des groupes de métaux couverts par ces chapitres.

Chacun des Chapitres 3 à 12 présente les informations relatives au groupe de métaux du chapitre en question, selon l'organisation suivante :

La section 1 décrit les procédés mis en œuvre et les techniques utilisées pour le groupe particulier de métaux.

La section 2 fournit des données et des informations concernant les niveaux d'émission et de consommation actuels, reflétant la situation dans les installations existantes au moment de la rédaction du document.

La section 3 décrit de manière plus détaillée les techniques de réduction des émissions et d'autres techniques considérées comme étant les plus pertinentes pour la détermination des MTD et des conditions d'autorisation basées sur ces MTD. Ces informations incluent les niveaux de consommation et d'émission qu'il est possible d'atteindre avec la technique considérée, donnent une estimation des coûts et des effets croisés associés à la technique, et précisent dans quelle mesure la technique est applicable aux installations nécessitant des autorisations IPPC par exemple aux installations nouvelles, existantes, de petite ou de grande taille. Les techniques généralement considérées comme obsolètes ne sont pas incluses.

La section 4 présente les techniques et les niveaux d'émissions et de consommations jugés compatibles avec les MTD au sens général. Le but est ainsi d'apporter des indications générales sur les niveaux d'émissions et de consommations qu'il est possible de considérer comme des valeurs de référence appropriées pour servir de base à la détermination des conditions d'autorisation reposant sur les MTD ou à l'établissement des prescriptions contraignantes générales mentionnées à l'article 9 (8). Il faut cependant souligner que ce document ne propose pas de valeur limite d'émission. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte des facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Dans le cas des installations existantes, il faut en outre tenir compte de la viabilité économique et technique de leur remise à niveau. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera souvent de faire des compromis entre différents types d'incidence sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes, il ne pourra pas les traiter tous d'une manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés dans les sections consacrées aux MTD ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontière, suppose que des conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base des considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que les autorités chargées de délivrer les autorisations tiennent compte de toutes les informations présentées dans ce document.

Etant donné que les meilleures techniques disponibles sont modifiées au fil du temps, le présent document sera révisé et mis à jour, le cas échéant. Toutes les éventuelles observations et propositions peuvent être envoyées au Bureau européen de l'IPPC à l'Institut des études de prospective technologique, à l'adresse suivante :

Edificio Expo-WTC, C/Inca Garcilaso, s/n, E-41092 Sevilla,- Spain

Telephone: +34 95 4488 284

Fax: +34 95 4488 426

e-mail eippcb@jrc.es

Internet: <http://eippcb.jrc.es>

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans les industries des métaux non-ferreux

Liste des figures

Liste des tableaux

Glossaire des termes

Les émissions associées dans l'air sont données sous la forme de moyennes journalières basées sur la surveillance en continu et les conditions standard de 273 K, 101,3 kPa, à la teneur d'oxygène mesurée et sur gaz sec, sans dilution des gaz avec l'air. Dans les cas où la surveillance en continu n'est pas possible, la valeur sera la moyenne sur la période de prélèvement.

Les émissions sont calculées comme étant la moyenne journalière, sauf indication contraire.

Les valeurs pour l'émission du carbone total dans l'air ne comprennent pas le monoxyde de carbone (CO).

Les émissions associées dans l'eau sont basées sur un échantillon aléatoire vérifié ou sur un échantillon composite sur 24 heures.

ppm signifie partie par million. Les concentrations de métaux ou d'autres substances dans l'eau ou les eaux usées sont données comme étant un total des matières solubles et insolubles.

ppb signifie partie par milliard

Une unité de post-combustion est - une unité de combustion supplémentaire spécifiquement conçue avec un système de brûleur (pas nécessairement utilisé tout le temps) qui fournit le temps de séjour, la température et la turbulence avec un taux d'oxygène suffisant pour oxyder des composés organiques en dioxyde de carbone. Les unités peuvent être conçues pour utiliser le contenu énergétique du gaz brut pour produire la majeure partie de la production de chaleur nécessaire et consomment moins d'énergie.

BAT (MTD) signifie Meilleures Techniques Disponibles selon l'article 2 (11) de la directive.

B(a)P est du benzo(a)Pyrène et est utilisé comme un indicateur de la teneur en HAP.

Un haut fourneau est un four vertical utilisant des tuyères pour faire exploser l'air chaud ou froid dans la charge du four pour faire fondre le contenu. (Egalement connu sous le nom de four à sole, four water jacket et un four à cuve pour le plomb).

CWPB est un procédé à anode précuite centrale.

DEVS4 = Essai de lixiviation selon la norme Allemande DIN 38 414.

Les dioxines comprennent les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzo-furanes (PCDF).

I-TEQ est l'équivalent toxique pour les PCDD/F

EU signifie Union européenne.

EFTA est la zone de libre échange européenne

EP signifie électrofiltre.

Les émissions fugitives sont des émissions non captées ou diffuses.

GWP est la potentiel de réchauffement global.

Le matériau ferré (Al, Cu) est un matériau qui comprend des composés de fer distincts.

« Si nécessaire » signifie si un polluant est présent et s'il a un impact environnemental.

Chenal de coulée – un canal utilisé pour transporter le métal ou laitier en fusion.

La liquation est une technique d'affinage qui implique l'étape consistant à chauffer un métal en fusion à la température à laquelle la solubilité des impuretés diminue de sorte qu'elles peuvent être séparées.

n.d signifie non disponible.

i.d signifie impossible à détecter

PFC signifie hydrocarbure polyfluoré.

La récupération est la récupération de chaleur. Dans ce secteur, la chaleur du procédé peut être utilisée pour préchauffer les matières premières, les combustibles ou l'air de combustion. Les brûleurs régénératifs sont conçus pour faire circuler les gaz chauds à l'intérieur du système de brûleur pour obtenir cela.

PB est une anode précuite.

SPL est un garnissage de cuve usé.

Les demi-produits sont des produits semi-finis tels qu'une tige, un fil, des extrusions, des lingots, etc., qui sont utilisés en tant que charge pour la production d'autres produits finis.

Un four à cuve est un four vertical utilisé pour la fusion du métal.

SWP est une anode précuite latérale.

La coulée est l'ouverture d'une sortie de four pour retirer le métal en fusion ou laitier.

VSS est une cellule pour anode Soderberg à goujons verticaux.

- **Unités**

µg	Microgramme	Kg	kilogramme	Nm ³	normal mètre cube (NTP) 273 K (0°C) 101,3 kPa (1 atmosphère)
€	Euro				
a	année	kWh	Kilowatt heure	Ng	Nanogramme
cm	centimètre	l	litre	Ppm	Parts par million
Cts (US)	Cents (États-Unis)	lb	Livre (avoirdupois)	Rpm	Tours (rotations) par minute
d	jour	m ³	Mètre cube	t	Tonne
DM	Deutsche Mark	mg	Milligramme	Wt%	% en poids
g	Gramme	mm	Millimètre	°C	Degré Celsius
Gj	Gigajoule	MJ	Mégajoule	K	Température absolue - Kelvin
h	heure	MWh	Megawatt heure		

- Symboles chimiques

Ag	Argent	HCl	Chlorure d'hydrogène	Pb	Plomb
Al	Aluminium	HF	Fluorure d'hydrogène	PbO	Oxyde de plomb
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium	Hf	Hafnium	S	Soufre
As	Arsenic	H	Mercure	SO ₂	Dioxyde de soufre
Au	Or	Ir	Iridium	SO ₃	Trioxyde de soufre
B	Bore	H ₂ SO ₄	Acide sulfurique	Se	Sélénium
Be	Beryllium	K	Potassium	Sn	Etain
Bi	Bismuth	K ₂ O	Oxyde de potassium	Sr	Strontium
C	Carbone	Li	Lithium	Sb	Antimoine
Ca	Calcium	Mg	Magnésium	Si	Silicium
CaO	Oxyde de calcium, chaux	MgO	Oxyde de magnésium, magnésie	SiO ₂	Silice, oxyde de silicium
Co	Cobalt	Mn	Manganèse	Ta	Tantale
Cd	Cadmium	MnO	Oxyde de manganèse	Ti	Titane
Cl	Chlore	Mo	Molybdène	Tl	Tellure
Cr	Chrome	Na	Sodium	Re	Rhénium
Cs	Césium	Nb	Nobium (columbium)	Rh	Rhodium
Cu	Cuivre	NO ₂	Dioxyde d'azote	Ru	Ruthénium
F	Fluor	Ni	Nickel	V	Vanadium
Fe	Fer	NO _x	Somme de tous les oxydes d'azote	W	Tungstène
FeO	Oxyde de fer	Os	Osmium	Zn	Zinc
Ga	Gallium	Pd	Palladium	ZnO	Oxyde de zinc
Ge	Germanium	Pt	Platine	Zr	Zirconium

PM sont les métaux précieux: - Ag, Au et PGM

PGM sont les métaux du groupe du platine: - Ir, Os, Pd, Pt, Rh, Ru

1 INFORMATIONS GENERALES

1.1 Procédés couverts par le champ du document

La production primaire et la production secondaire des métaux non-ferreux présentent de nombreuses similitudes, au point que, dans certains cas, il est impossible de différencier les techniques utilisées. La production secondaire des non-ferreux comprend la production de métal à partir des matières premières secondaires (y compris les déchets) et les procédés de refusion et d'alliage. Le présent BREF couvre les techniques liées à la production des métaux non-ferreux primaire et secondaire.

La production d'anode en carbone et en graphite (section 6.8 de l'annexe I de la directive IPPC) est comprise car dans certaines fonderies d'aluminium, cette activité fait partie intégrante du processus de production.

La production de 42 métaux non-ferreux, plus des ferro-alliages, a été recensée dans les pays qui sont tenus d'appliquer l'IPPC. 10 groupes de métaux dont les méthodes de production sont similaires ont été identifiés. Ce document est organisé sur cette base.

Les groupes sont les suivants:

- **Cu et ses alliages, Sn et Be,**
- **Al et ses alliages,**
- **Zn, Pb, Cd, Sb et Bi,**
- **Métaux précieux,**
- **Mercure,**
- **Métaux réfractaires, par exemple. Cr, W, V, Ta, Nb, Re, Mo,**
- **Ferroalliages, par exemple FeCr, FeSi, FeMn, SiMn, FeTi, FeMo, FeV, FeB,**
- **Les métaux alcalins et les alcalinoterreux Na, K, Li, Sr, Ca, Mg et Ti,**
- **Ni et Co,**
- **Carbone et graphite pour électrodes.**

La production des métaux radioactifs est exclue de l'étude, de même que celle des composés tels que les semi-conducteurs.

Les installations visées au point 2.1 de l'annexe I de la directive - l'agglomération et le grillage sont couverts par ce document. Les opérations d'agglomération et de grillage ont été prises en compte dans deux cas : - a) lorsqu'elles faisaient partie du procédé 2.5.a) pour produire le métal, - b) lorsque le grillage et le frittage sont réalisés indépendamment, par exemple le grillage du sulfure de molybdène.

Le secteur des non-ferreux comporte des procédés qui relèvent du secteur des produits chimiques, toutefois certains de ces procédés présentent des aspects et des différences qui sont spécifiques à l'industrie des non-ferreux et qu'il convient donc de prendre en compte. C'est le cas des opérations associées à la production de métal ou encore lorsque les composés métalliques sont obtenus comme sous-produits de la production de métal. Les procédés suivants ont été inclus dans le champ de ce document.

La production des produits soufrés tels que le soufre élémentaire, le dioxyde de soufre et l'acide sulfurique, lorsqu'elle est associée à la production d'un métal non-ferreux. Dans le cas de l'acide sulfurique, il est produit à partir du dioxyde de soufre présent dans les gaz émis à différents stades du procédé. La concentration des gaz, leur température et la présence de polluants en traces influent sur la conception du procédé et sur le choix du catalyseur.

- La production d'oxyde de zinc à partir des vapeurs dégagées pendant la production d'autres métaux ;
- La production des composés de nickel à partir des solutions produites pendant la production d'un métal ;

- La production de CaSi et Si qui intervient dans le même four que la production de ferrosilicium ;
- La production d'oxyde d'aluminium à partir de la bauxite en amont de la production de l'aluminium primaire. Il s'agit d'une étape de prétraitement qui peut être effectuée à la mine ou dans l'usine d'aluminium. Dans ce dernier cas, elle fait partie intégrante de la production du métal et est incluse dans le BREF.

Les opérations de laminage, d'emboutissage et de compression des métaux non-ferreux, lorsqu'elles sont directement intégrées à la production du métal seront couvertes par une autorisation et sont donc incluses dans le présent document. Les procédés de fonderie ne sont pas inclus dans ce document et sont couverts par ailleurs.

1.2 Vue d'ensemble de l'industrie

L'industrie européenne des métaux non-ferreux a une importance économique et stratégique supérieure à ce qu'indiquent les statistiques en matière d'emploi, de capital et de chiffre d'affaires. Par exemple, le cuivre de haute pureté est essentiel pour la production et la distribution de l'électricité et de petites quantités de nickel améliorent la résistance à la corrosion de l'acier.

Par conséquent, les métaux non-ferreux et leurs alliages se trouvent au cœur de la vie moderne et de nombreux développements de haute technologie, en particulier dans l'informatique, l'électronique, les télécommunications et les industries du transport qui en dépendent.

1.2.1 Métaux non-ferreux et alliages

Tous les métaux non-ferreux pris en considération dans ce document et listés dans le paragraphe 1.1 ci-dessus ont leurs propres propriétés et applications. Cependant dans de nombreux cas, par exemple le cas du cuivre et de l'aluminium, un plus grand nombre d'applications font appel aux alliages plutôt qu'aux métaux purs, parce qu'ils peuvent être conçus pour avoir une résistance spécifique, une dureté, etc. afin de satisfaire les exigences de ces applications particulières.

Les métaux qui sont recyclables par nature peuvent être recyclés chaque fois sans perdre aucune de leurs propriétés. Ils apportent ainsi une contribution significative au développement durable. Normalement, il est impossible de distinguer le métal affiné qui a été produit à partir de matières premières primaires ou secondaires et celui qui a été produit à partir de matières premières secondaires (c'est-à-dire les déchets, etc.).

1.2.2 Portée de l'industrie

Le produit de l'industrie provient de toute une variété de matières premières primaires et secondaires. Les matières premières primaires proviennent de minerais qui sont extraits de mines, subissent ensuite une transformation avant d'être soumis aux processus métallurgiques pour produire un métal brut. La transformation des minerais est réalisée à proximité de la mine, ainsi que, progressivement, la production de métaux. Les matières premières secondaires sont des déchets et des résidus locaux.

En Europe, les gisements de minerais contenant des métaux en concentration viable se sont progressivement épuisés, et seules quelques sources locales subsistent. La plupart des concentrés sont donc importés en Europe de plusieurs sources mondiales.

Le produit élaboré par l'industrie est soit du métal affiné, soit ce que l'on appelle des demi-produits, c'est-à-dire des métaux et des alliages obtenus sous forme de lingots coulés ou de formes travaillées, sous la forme de profil extrudé, de feuille, feuillard, de barre, etc.

Les fonderies de non-ferreux qui produisent des produits métalliques coulés ne sont pas incluses dans le présent BREF, mais sont couvertes par le BREF relatif aux forges et aux fonderies. La collecte, le

tri et l'approvisionnement des matières premières secondaires pour l'industrie font partie de l'industrie de recyclage des métaux, qui à nouveau n'est pas pris en considération dans le présent BREF.

Bien que ceci représente une contradiction linguistiquement apparente, la production des ferroalliages, qui sont principalement utilisés en tant qu'alliage maître dans l'industrie du fer et de l'acier, est considérée comme faisant partie de l'industrie des métaux non-ferreux. Ces éléments d'alliage, c'est-à-dire les métaux réfractaires, le chrome, le silicium, le manganèse et le nickel sont tous des métaux non-ferreux.

Le secteur des métaux précieux est également considéré comme faisant partie de l'industrie des métaux non-ferreux pour le présent document.

1.2.3 Structure de l'industrie

La structure de l'industrie varie selon les métaux. Il n'existe pas de sociétés qui produisent tout, ou même une majorité de métaux non-ferreux bien qu'il existe quelques entreprises paneuropéennes qui produisent plusieurs métaux, par exemple du cuivre, du plomb, du zinc, du cadmium, etc.

La taille des sociétés productrices de métaux et d'alliages métalliques en Europe se décline sur un très large éventail, de quelques grandes sociétés de plus de 5 000 salariés à une multiplicité de petites entreprises de 50 à 200 personnes.

Leur forme de propriété est également variable et comprend des groupes métallurgiques paneuropéens et nationaux, des holdings industriels, des sociétés publiques autonomes et des sociétés privées.

1.2.4 Economie de l'industrie

Les statistiques clé de l'industrie des métaux non-ferreux européennes définies pour le présent document sont les suivantes :

Production	18 - 20 millions de tonnes
Ventes	40 - 45 milliards d'euros
Employés	plus de 200 000

De nombreux métaux non-ferreux affinés font l'objet d'échanges internationaux. Les principaux métaux (aluminium, cuivre, plomb, nickel, étain et zinc) sont commercialisés sur l'un des deux marchés à termes, le London Metal Exchange et le Comex à New York. Les métaux collectivement dénommés « mineurs » n'ont pas de marché central ; les prix sont imposés par les producteurs ou par les marchands négociant dans les marchés libres. Dans la plupart des applications, les métaux non-ferreux sont en concurrence avec d'autres matériaux, notamment les céramiques, les matériaux plastiques et d'autres métaux ferreux et non-ferreux.

La rentabilité de chaque métal ou groupe de métaux, et donc la viabilité économique de l'industrie varie, de manière absolue et à court terme, en fonction du prix du métal actuel et d'un grand éventail d'autres facteurs économiques.

La règle économique générale s'applique cependant c'est-à-dire que plus un matériau ou un produit se rapproche des conditions d'ensemble du marché et des échanges internationaux, plus le retour sur le capital investi est faible.

Il existe ainsi plusieurs contraintes concernant la disponibilité du capital pour les dépenses improductives en matière d'améliorations de la protection de l'environnement. Elles font généralement partie d'un développement et d'une amélioration du procédé global. Les investissements dans les améliorations environnementales et de procédés doivent en général être compétitifs dans un environnement global, étant donné que l'industrie européenne est en concurrence avec des installations similaires dans d'autres pays développés et en développement.

1.2.5 Performance environnementale

Depuis vingt cinq ans, on assiste à une amélioration régulière et dans certains cas très significative de la performance environnementale et de l'efficacité énergétique de l'industrie en raison de l'adoption de la directive 84/360/EEC « concernant le contrôle de la pollution provenant des installations industrielles ». L'exigence demandant d'utiliser les Meilleures Techniques Disponibles pour minimiser la pollution est bien comprise par l'industrie dans la plupart des Etats membres.

La performance de recyclage de l'industrie est inégalée par les autres industries.

1.3 Le cuivre et ses alliages

1.3.1 Généralités

Le cuivre est utilisé depuis plusieurs siècles ; il présente une conductivité thermique et électrique très élevée et est relativement résistant à la corrosion. Le cuivre usagé peut être recyclé sans perte de qualité. Ces propriétés signifient que le cuivre est utilisé dans différents secteurs tels que le génie électrique, le secteur de l'automobile, la construction, la plomberie, la fabrication de machines, les chantiers navals, l'industrie de l'aviation et les instruments de précision. Le cuivre est fréquemment allié avec Zn, Sn, Ni, Al et d'autres métaux pour proposer une gamme de laitons et de bronzes [tm36, Panorama 1997].

La production de cuivre est basée sur les cathodes de cuivre qualité A, c'est-à-dire 99,95 % Cu. La désignation qualité A vient du vocabulaire du London Metal Exchange pour les cathodes et se réfère à une norme britannique. Celle-ci a été récemment remplacée par la norme européenne CEN-EN 1978, où la qualité est désignée par Cu CATH1 ou dans le nouveau système alphanumérique européen CR001A.

Les pourcentages maximaux d'impuretés tolérées sont les suivants :

- Ag 0,0025 - As 0,0005 - Bi 0,00020 - Fe 0,0010 - Pb 0,0005 - S 0,0015 - Sb 0,0004 – Se 0,00020
- Te 0,00020 avec As+Cd+Cr+Mn+P+Sb 0,0015
- Bi+Se+Te 0,0003
- Se+Te 0,0003
- Ag+As+Bi+Cd+Co+Cr+Fe+Mn+Ni+P+Pb+S+Sb+Se+Si+Sn+Te+Zn 0,0065

1.3.2 Sources des matériaux

Le cuivre affiné est produit à partir de matières premières primaires et secondaires par un nombre relativement petit de raffineries de cuivre ; leur produit est la cathode de cuivre. Celle-ci est fondue, alliée et ensuite traitée pour produire des barres, des profilés, des fils, des tôles, des feuillards, des tubes, etc. Cette étape peut être intégrée avec l'affinage mais est fréquemment réalisée sur un autre site.

Les raffineries de cuivre achètent environ 55 % de leurs approvisionnements sur le marché international sous la forme de concentrés de cuivre, de blister, d'anode ou de déchets. Les 45 % restants proviennent des concentrés de cuivre nationaux ainsi que des résidus ou déchets de cuivre nationaux.

L'Union européenne ne possède que quelques ressources de cuivre primaire, mais ses activités métallurgiques concernant le cuivre sont très importantes. On ne peut trouver de production minière de cuivre de taille importante qu'au Portugal (début de l'exploitation de Neves Corvo en 1989, 106 500 tonnes de cuivre en 1997) et en Suède (86 600 tonnes). Avec environ 239 000 tonnes de cuivre extrait des minerais nationaux en 1997, la production de cuivre européenne représente environ 2 % de la production minière mondiale.

On a développé les capacités d'affinage et de fabrication de demi-produits pour répondre aux besoins de leur importante consommation, en utilisant des matières premières primaires importées et nationales ainsi que des déchets importés. L'accès aux matières premières primaires est de plus en plus difficile depuis quelques années, étant donné que les pays producteurs de cuivre ont développé leurs propres installations d'affinage à proximité de leurs mines, réduisant ainsi la disponibilité de matières premières sur le marché international.

Le recyclage constitue une composante importante des approvisionnements de matières premières dans les installations de fabrication et d'affinage de cuivre. En tout, les matières premières secondaires représentent environ 45 % de l'utilisation de cuivre et de ses alliages en Europe, soit par les raffineries en tant que tout ou une partie de leur alimentation ou par les fabricants de demi-produits directement.

La qualité des matières premières secondaires varie considérablement et de nombreuses sources de ces matériaux ne sont pas adaptées à une utilisation directe par les fabricants de demi-produits. L'industrie du déchet est censée fournir des matières secondaires calibrées de pureté adaptée pour l'industrie, et bien qu'il y ait des spécifications convenues pour les déchets, on rencontre de grandes variations. Des systèmes de traitement ou de dépollution supplémentaires peuvent être nécessaires.

1.3.3 Production et consommation

La production annuelle de cathode de cuivre au moment de la rédaction est de 959 000 tonnes provenant des sources primaires et 896 000 tonnes provenant des sources secondaires. Le béryllium n'est pas produit dans l'Union européenne et n'est pas censé être présent en quantités suffisantes dans les déchets pour présenter des problèmes environnementaux.

Trois des fonderies de deuxième fusion et presque toutes les fonderies de première fusion ont augmenté leur capacité de production. Cette augmentation significative de la capacité de production s'est faite conjointement avec les améliorations environnementales. Les déchets informatiques et les cartes de circuit imprimé sont des sources secondaires de plus en plus courantes, bien que leur teneur en cuivre soit faible. Le déchet est prétraité à la fois par l'industrie des déchets et par certaines fonderies. Ceci représente un débouché pour ces matériaux.

Le recyclage a atteint un niveau élevé car le cuivre peut être recyclé sans perte de ses propriétés intrinsèques et de nombreuses matières secondaires sont disponibles. L'activité d'affinage du cuivre de l'Union européenne s'est principalement développée en sécurisant ses approvisionnements de matières premières sur le marché international et en utilisant les déchets et résidus de cuivre ou de laiton générés par les consommateurs et les entreprises de transformation.

Les fabricants de demi-produits en cuivre de l'Union européenne ont une production qui représente trois fois celle des raffineries de l'Union européenne. Ils utilisent le marché international pour sécuriser leurs approvisionnements de cuivre et de laiton, ainsi que d'alliages (principalement de zinc, d'étain et de nickel). Cette partie de l'industrie est un exportateur net d'environ 500 000 tonnes par an.

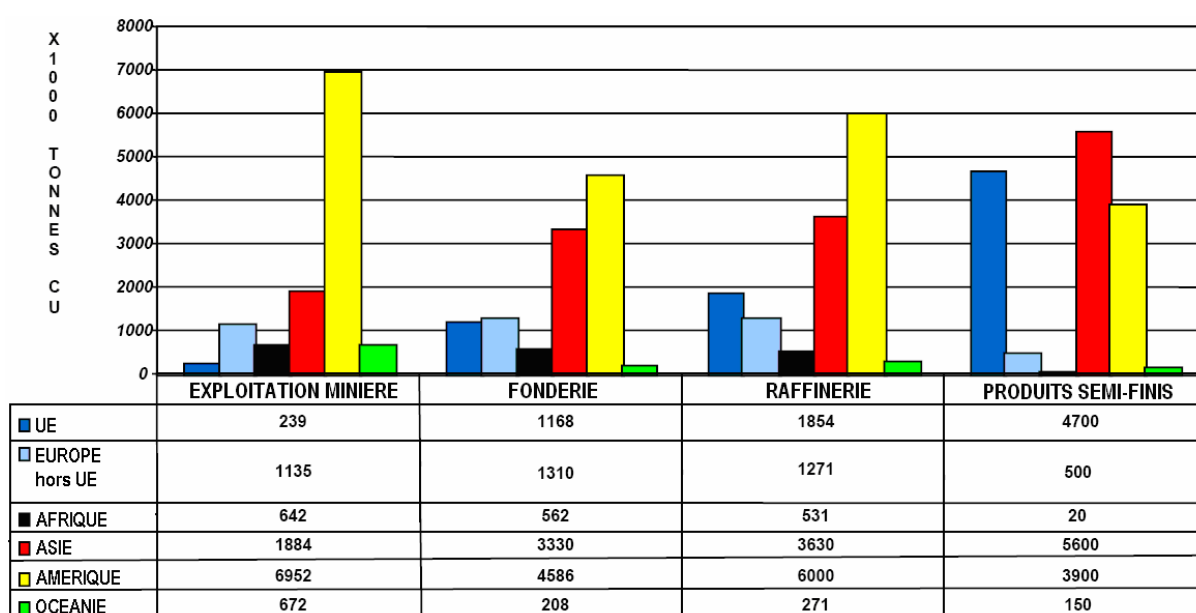


Figure 1.1: Production mondiale de cuivre en 1997

Pays	Production minière	Cathode primaire (anode)	Cathode secondaire (anode)	Production des produits semi-finis
Autriche			77	58
Belgique		203 (35)	183 (126)	392
Danemark				
Finlande	9	116 (171)		120
France		6	29	684
Allemagne		296	378	1406
Grèce				81
Irlande				
Italie		6	80	990
Luxembourg				
Pays-bas				
Portugal	108			
Espagne	37	229 (+61)	63 (+28)	268
Suède	87	95	34	206
Grande-Bretagne		9	58	483
Islande				
Norvège	7*	33		
Suisse				70

Note : * La production actuelle de minerai cessera en 2000

Tableau 1.1: UE (et EAA) Production de cuivre et ses alliages en milliers de tonnes en 1997
La production de minerai en Europe représente environ 30% des matières premières

1.3.4 Sites de production

Il y a dix raffineries principales dans l'Union européenne. Cinq utilisent des matières premières primaires et secondaires et les autres n'utilisent que des matières premières secondaires. On a estimé que l'industrie de l'affinage du cuivre employait plus de 7 500 personnes en 1997. Trois sociétés présentent des capacités de plus 250 000 tonnes de cathodes de cuivre affinées par an : Atlantic Copper (E), Union Minière (B) et Norddeutscheaffinerie (D). Quatre autres, MKM Hettstedt (D), Hüttenwerke Kayser (D), Boliden (SW) et Outokumpu (FIN), produisent chacune plus de 100 000 tonnes par an. La capacité de production dans les autres unités réparties en Italie, en Espagne, en Autriche, au Royaume-Uni et en Belgique est comprise entre 35 000 et 100 000 tonnes de cathodes de cuivre par an.

Il y a beaucoup plus de sociétés dans l'industrie de la fabrication des demi-produits. Elles utilisent du cuivre affiné et des matières premières secondaires de haute qualité en tant que charge. Ceci représente environ 100 sociétés dans toute l'Union européenne, employant quelques 40 000 personnes. L'industrie peut souffrir d'une surcapacité et est sensible aux mouvements cycliques de la demande. La demande de cuivre de l'Union européenne suit le modèle de croissance lent d'un marché mature.

Le secteur des fils machines électriques s'élève à environ la moitié de la production des demi-produits. Quelques 20 sociétés employant environ 3 000 personnes travaillent dans ce secteur. Une partie significative de cette activité est liée au secteur du câble en tant que source d'entrée intégrée en amont (Alcatel, Pirelli, BICC, etc.) alors qu'une autre partie est liée au secteur de l'affinage en tant que sortie intégrée en aval (Deutsche Giessdracht, Norddeutscheaffinerie, Union minière, Atlantic Copper, etc.).

Il y a beaucoup plus de sociétés dans les autres industries de production de demi-produits en cuivre, produisant du cuivre et des alliages de cuivre sous forme de tiges, barres, fils, sections, tubes, plaques, tôles et feuillards : ceci représente environ 80 sociétés dans toute l'Union européenne, employant quelques 35 000 personnes. L'industrie est cependant dominée par trois grands groupes : KME-Europa Metal (D), avec les activités principales de production en France, Allemagne, Italie et Espagne ; Outokumpu (FIN) en Finlande, Suède, Pays-Bas et Espagne ; et Wieland Werke (D) en Allemagne et en Grande-Bretagne. Les autres sociétés principales indépendantes sont représentées par Boliden (S),

avec des usines en Suède, aux Pays-Bas, en Belgique et au Royaume-Uni, Carlo Gnutti (I), et IMI (UK).

On a assisté à une rationalisation considérable et à un investissement ultérieur dans l'industrie du cuivre en Europe ces vingt dernières années. Ceci a représenté la réponse à la création du marché unique dans l'Union européenne et aux pressions économiques, telles que l'augmentation des coûts de l'énergie, le besoin d'un investissement substantiel pour la dépollution et les changements fréquents des taux de change.

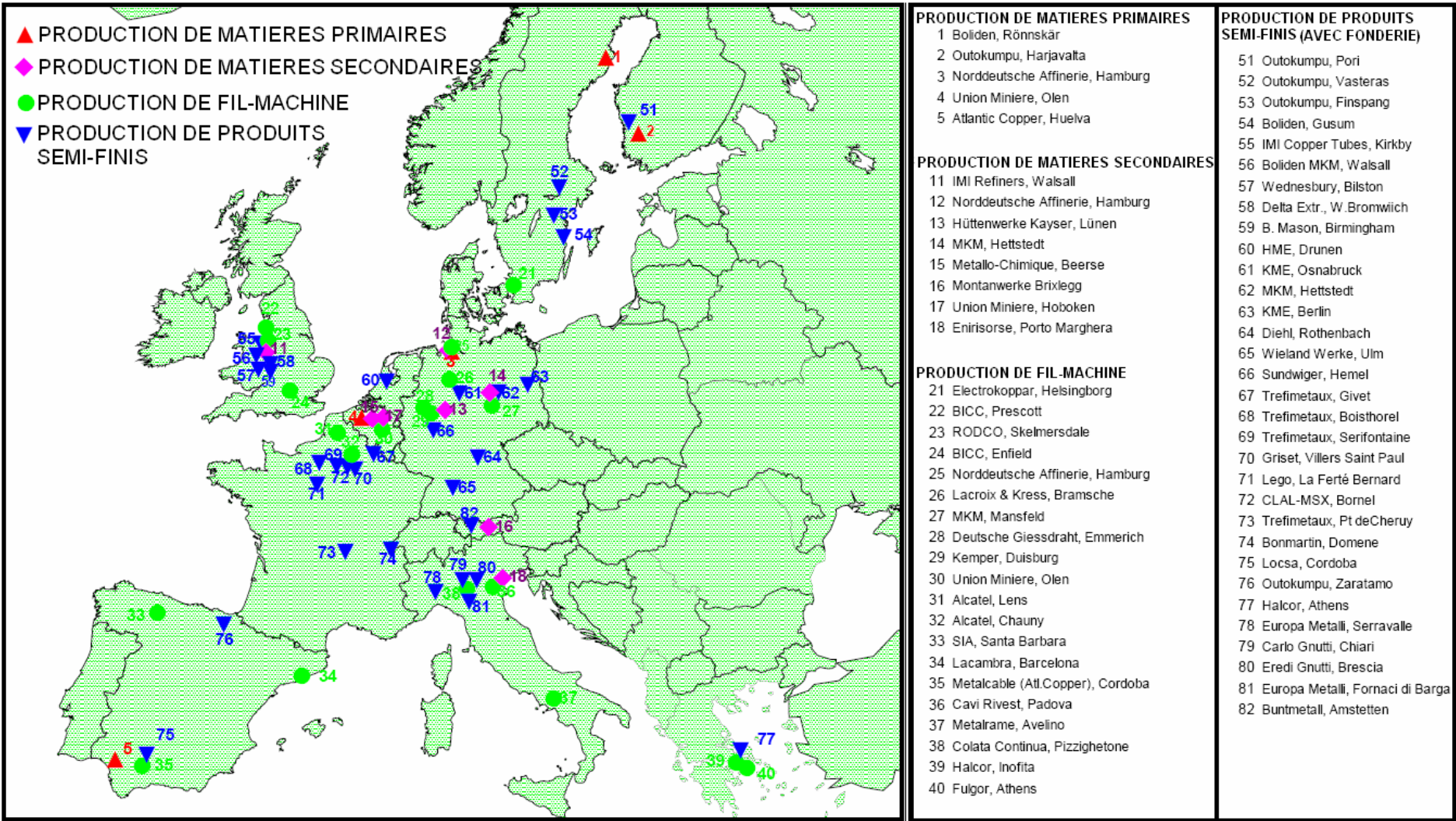


Figure 1.2 : Sites de production européens [sur figure : PRODUCTION PRIMAIRE / PRODUCTION SECONDAIRE]

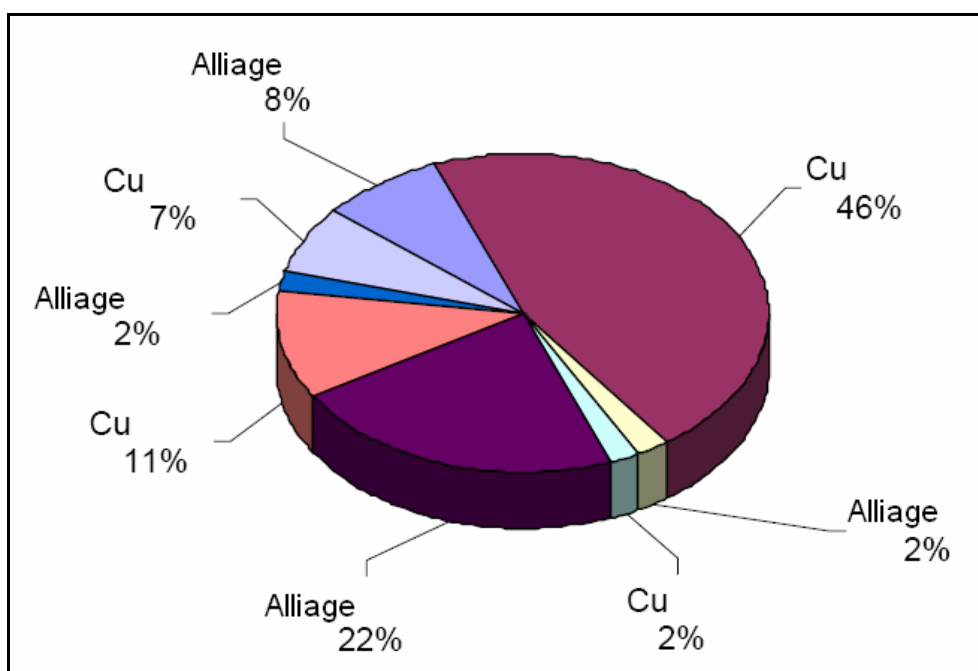


Figure 1.3 : Production de produits semi-finis en cuivre en 1995. Total pour 1995 = 4 700 000 tonnes

1.3.5 Problèmes environnementaux

Traditionnellement, le principal problème environnemental associé à la production du cuivre provenant des sources primaires a été l'émission du dioxyde de soufre dans l'air provenant du traitement par agglomération et fusion des concentrés de soufre. Ce problème a été efficacement résolu par les fonderies de l'Union européenne qui atteignent maintenant en moyenne un traitement de 98,9 % de soufre et produisent de l'acide sulfurique et du dioxyde de soufre liquide.

Les principaux problèmes environnementaux associés à la production du cuivre secondaire concernent également les rejets de gaz des différents fours en fonctionnement. Ces gaz sont traités dans des filtres à manches qui peuvent ainsi réduire les émissions de poussières et des composés métalliques tels que le plomb. On assiste également à la formation potentielle des dioxines due à la présence de petites quantités de chlore dans les matières premières secondaires et la destruction des dioxines est un problème à prendre en compte.

Les émissions fugitives ou non captées représentent également un problème qui devient de plus en plus important pour la production primaire et secondaire. Une conception de l'usine et une exploitation du procédé soigneuses sont nécessaires pour capter les gaz de procédé.

Le traitement des émissions dans l'air et des rejets dans l'eau de la production de fils machines en cuivre et des demi-produits en cuivre et alliage de cuivre s'est bien développée. L'optimisation du brûleur permet de limiter les émissions de monoxyde de carbone provenant des fours à cuve en particulier ceux fonctionnant en atmosphère réductrice.

Le recyclage constitue une partie importante des approvisionnements de matières premières des unités de fabrication et d'affinage de cuivre. Le cuivre peut être récupéré de la majeure partie de ses applications et réintroduit dans le procédé de production sans perte de qualité lors du recyclage. Ayant un accès très limité aux sources primaires nationales de cuivre, l'industrie européenne a traditionnellement porté son attention sur les soi-disant « mines à ciel ouvert », dépendant en grande partie des approvisionnements de déchets, pour réduire le grand déficit de sa balance commerciale de matières premières de cuivre. On recycle presque 100 % des nouveaux déchets de cuivre ou déchets de cuivre de procédé et selon certaines études, on a estimé que 95 % des vieux déchets de cuivre qui sont disponibles sont également recyclés.

Dans l'ensemble, les matières premières secondaires représentent environ 45% de la production du cuivre européen mais dans certains cas, tels que celui des tiges en laiton, le produit est complètement fabriqué à partir de cuivre et de laiton recyclés, avec seulement une petite partie de zinc primaire.

L'industrie européenne du cuivre a développé des technologies avancées et fait des investissements considérables pour pouvoir traiter une grande gamme de déchets de cuivre, comprenant les résidus complexes et de mauvaise qualité, et se conformer en même temps aux contraintes environnementales de plus en plus sévères.

La capacité de l'industrie à accroître ce taux de recyclage élevé dépend d'un certain nombre de facteurs complexes.

1.4 Aluminium

1.4.1 Général

L'aluminium [tm 36, panorama 1997] est un matériau avec une large plage d'applications, dans les industries du transport, de la construction et de l'emballage, le secteur de l'électricité, dans tous les systèmes de distribution d'électricité à haute tension, les appareils électroménagers et les secteurs mécaniques et agricoles. Il est léger, présente une bonne conductivité électrique et forme une couche d'oxyde de surface lorsqu'il est exposé à l'air qui empêche la corrosion. L'aluminium est très réactif en particulier sous la forme de poudre et est utilisé pour les réactions alumino-thermiques afin de produire toute une variété d'autres métaux.

L'industrie de l'aluminium est la plus jeune et la plus grande des industries des métaux non-ferreux, la fusion de l'aluminium a commencé il y a seulement un siècle. L'industrie européenne de l'aluminium représente directement une masse salariale d'environ 200 000 personnes et son chiffre d'affaires annuel est de l'ordre de 25 milliards d'Euros. La production totale du métal brut s'élevait à 3,9 millions de tonnes en 1997. Environ 43 % de cette production sont représentés par le traitement des déchets recyclés, qui est en constante progression.

1.4.2 Sources des matériaux

L'aluminium primaire est produit à partir de la bauxite qui est transformée en alumine. 100 tonnes de bauxite donnent de 40 à 50 tonnes d'alumine (oxyde d'aluminium) qui produisent ensuite 20 à 25 tonnes d'aluminium. La plupart de la bauxite provient des mines situées hors du territoire européen mais on trouve plusieurs sites de production d'alumine en Europe.

L'industrie secondaire dépend des sources de déchets. Le déchet peut être appelé « nouveau déchet » lorsqu'il est généré pendant la production et la fabrication des produits travaillés et moulés ou « anciens déchets » lorsqu'il est récupéré des articles en fin de vie. Le taux de recyclage des « nouveaux déchets » représente 100 % de la quantité produite. L'approvisionnement des matières premières pour l'industrie primaire et secondaire européenne est largement satisfait par la production d'alumine et le recyclage de déchets effectués en Europe. Cependant la production totale de métal ne suffit pas aux besoins de l'industrie de transformation et à présent ne satisfait que 55 % de la demande européenne.

1.4.3 Production et consommation

L'industrie européenne de l'aluminium est représentée par l'exploitation minière et la production d'alumine, la fusion primaire et secondaire et la transformation des métaux en produits semi-finis (par exemple barres, profilés, fils, tôles, feuillards, tubes, tuyaux) ou produits spéciaux (par exemple poudres, alliages spéciaux).

Région	Production	Consommation
Europe	3216	5603
USA	3603	5390
Russie	2907	509
Canada	2327	642
Chine	1776	2013
Australie	1495	362
Brésil	1189	479
Vénézuela	643	193

Tableau 1.2: Production d'aluminium primaire par pays en 1997 (milliers de tonnes)

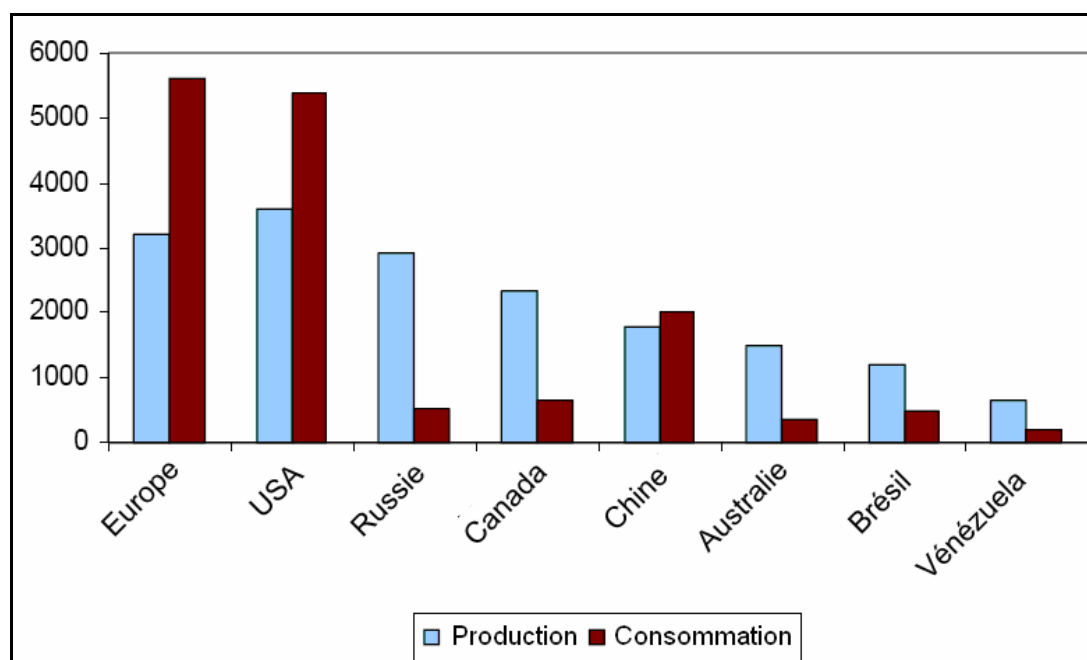


Figure 1.4: Production d'aluminium primaire par pays en 1997 (en millier de tonnes)

La plupart de ces activités sont intégrées, mais un certain nombre de fabricants européens concentrent leur activité sur un segment particulier uniquement, tel que le recyclage ou la fusion secondaire ou la fabrication des produits semi-finis.

L'Union européenne fournissait 10 % de la production mondiale totale en 1997. La production de l'aluminium provenant des matières premières secondaires dans l'Union européenne est l'une des plus importantes au monde avec environ 1,7 millions de tonnes en 1997. Ceci représentait 23 % de la production des pays occidentaux à partir de matériaux recyclés.

1.4.4 Sites de production

Au début de l'année 1998, on comptait vingt-deux fonderies d'aluminium primaire dans l'Union européenne, et huit autres dans l'EEA. En fait, le nombre de producteurs est nettement inférieur : les principales sont Aluminium Pechiney (F), VAW aluminium (D), Alcoa Espagne (E), Alcoa Italie (I), ou Hoogovens (NL), British Alcan (UK), Hydro (N) et Alusuisse (CH). Certaines de ces sociétés exploitent des usines dans différents pays européens ou ont des filiales ou des succursales dans d'autres régions du monde, ou font partie de sociétés internationales.

Le nombre de sociétés qui produisent de l'aluminium secondaire est nettement plus important. On trouve environ 200 sociétés dont la production annuelle d'aluminium secondaire est supérieure à 1 000 tonnes par an [tm 116, Alfred 1998]. On assiste à une bonne intégration de l'activité de laminage avec les procédés de production mais l'industrie de l'extrusion est nettement moins intégrée, avec environ 200 sites de production dispersés sur le territoire européen.

Pays	Production de bauxite en milliers de tonnes	Production d'alumine en milliers de tonnes	Aluminium primaire en milliers de tonnes	Aluminium secondaire en milliers de tonnes	Production de produits semi-finis en milliers de tonnes
Autriche				98	189
Belgique					353
Danemark				14	18
Finlande				33	35
France		600	399	233	741
Allemagne		750	572	433	1797
Grèce	2211	640	133	10	213
Irlande		1250			
Italie		880	188	443	862
Luxembourg					
Pays-bas			232	150	200
Portugal				3	
Espagne		1110	360	154	330
Suède			98	26	131
Grande-Bretagne		120	248	257	507
Islande			123		
Norvège			919	59	250
Suisse			27	6	131
Total Europe	2211	5350	3216	1803	5757

Tableau 1.3: Production européenne d'aluminium en 1997

1.4.5 Problèmes environnementaux

Les principaux problèmes environnementaux concernant l'aluminium primaire sont la production des hydrocarbures polyfluorés et des fluorures pendant l'électrolyse, la production de déchets solides provenant des cuves et la production de déchets solides pendant la production de l'alumine. De même, pour la production de l'aluminium secondaire, il y a des émissions potentielles de poussières et de dioxines provenant des fours mal exploités et d'une mauvaise combustion et la production de déchets (laitier salé, garnissage de four usé, scories et poussières sous filtre). L'industrie a fait des efforts pour réduire ces émissions. Elles ont été réduites ces quinze dernières années selon un rapport de 4 à 10, en fonction du type d'émission et du procédé utilisé.

L'électricité représente le poste principal de dépense pour produire de l'aluminium primaire et les sites de production ont tendance à se concentrer dans les régions où l'électricité est bon marché, ce qui influence la répartition des sites. L'industrie européenne de l'aluminium a fait des efforts considérables pour réduire sa consommation d'électricité, passant de 17 kWh, par kg produit en 1980 à 15 kWh par kg en 1998. La production et l'affinage de l'aluminium secondaire demandent nettement moins d'énergie et consomme moins de 5 % de l'énergie nécessaire pour la production de l'aluminium primaire.

Il existe de nombreuses initiatives visant à améliorer le retour de déchets d'aluminium et l'industrie joue un rôle actif dans ce domaine. Le recyclage des cannettes de boisson usagées (UBC) en est un exemple. Le matériau collecté est recyclé en circuit fermé pour produire davantage de cannettes de boisson avec la même spécification d'alliage. L'industrie secondaire veille à la production d'une composition d'alliage convenable et le tri préalable par types de déchets est essentiel. La ségrégation des déchets d'extrusion pour préserver l'alliage particulier en est un exemple.

1.5 Zinc, plomb et cadmium

1.5.1 Zinc

1.5.1.1 Général

Parmi les métaux non-ferreux, l'utilisation du zinc [tm 36, panorama 1997 ; tm 120, TU Aachen 1998] arrive en troisième place, derrière l'aluminium et le cuivre. Il a un point de fusion relativement bas et est utilisé pour produire un certain nombre d'alliages comme le laiton. Il peut facilement s'appliquer sur la surface des autres métaux tels que l'acier (galvanisation), et lorsqu'il est utilisé en tant que revêtement métallique, le zinc se corrode de préférence comme un revêtement sacrificiel. Le zinc est également utilisé dans les industries pharmaceutiques, alimentaires, de la construction, des batteries et des produits chimiques.

Utilisation commerciale du zinc	Dans le monde en 1975 (%)	Dans le monde en 1984 (%)	Dans le monde en 2005 (%)	En Europe en 1995 (%)
Galvanisation	38,0	48,5	54,8	43
Laiton	19,8	17,6	16,6	23
Moulage sous pression	18,3	14,3	10,5	13
Produits semi-finis	8,5	7,3	6,4	12
Produits chimiques	12,7	9,6	8,0	8
Autres	2,8	2,7	3,7	1

Tableau 1.4: Utilisations mondiales et européennes du zinc

Le zinc est mis sur le marché sous plusieurs qualités ; la plus haute qualité est la haute qualité spéciale (SHG) ou Z1 qui contient 99,995 % de zinc alors que la moins bonne qualité du zinc GOB (good ordinary brand – bonne marque ordinaire) ou Z5 est pur à environ 98 %. On produit des produits d'extrusion tels que les barres, les tiges et les fils (principalement le laiton) ; des produits de laminage tels que les tôles et les feuillards ; des alliages sous pression, et des poudres et des composés chimiques tels que les oxydes.

Classification Qualité	Code couleur	Teneur nominale en zinc	1 Pb max.	2 Cd* max.	3 Fe max.	4 Sn max.	5 Cu max.	6 Al max.	Total de 1 à 6 max.
Z1	Blanc	99,995	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005
Z2	Jaune	99,99	0,005	0,005	0,003	0,001	0,002	-	0,01
Z3	Vert	99,95	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	-	0,05
Z4	Bleu	99,5	0,45	0,01	0,05	-	-	-	0,5
Z5	Noir	98,5	1,4	0,01	0,05	-	-	-	1,5

Note :
 * Pendant une période de cinq ans après la date de ratification de cette norme, la teneur maximum en Cd des qualités Z3, Z4 et Z5 sera de 0,020, 0,050 et 0,050 respectivement.

Tableau 1.5: Qualités du zinc primaire

Qualité	Teneur nominale en zinc	1 Pb max.	2 Cd* max.	3 Fe max.	4 Sn max	5 Cu max	6 Al max	Total de 1 à 6 max.	Remarques
ZS1	98,5	1,4	0,05	0,05	*)	-	-	1,5**)	Qualités principalement produites par recyclage des déchets et produits usages
ZS2	98	1,6	0,07	0,12	*)	-	-	2,0**)	
ZS3	97,75	1,7	0,09	0,17	-	-	-	2,25	
ZSA	98,5	1,3	0,02	0,05	-	-	-	1,5	Qualités principalement produites avec des résidus et des cendres contenant du Zn
Note : *) Sn max 0,3% pour la fabrication du laiton, 0,7% pour la galvanisation. Lorsqu'elle est présente à ces niveaux, la véritable teneur en Zn peut être inférieure à la teneur nominale en Zn **) Sauf Sn, lorsqu'il est présent aux niveaux donnés au point *)									

Tableau 1.6: Qualités du zinc secondaire

Les utilisations finales comprennent une grande plage d'applications, dont la plus importante est de protéger l'acier contre la rouille pour les industries de l'automobile, de l'électroménager et du bâtiment. Les alliages de zinc (par exemple laiton, bronze, alliage sous pression) et les produits semi-finis en zinc représentent respectivement les second et troisième secteurs de consommation principaux avec des applications également dans les industries du bâtiment, de l'électroménager et de l'automobile.

1.5.1.2 Sources des matériaux

Le métal est produit à partir de toute une gamme de concentrés de zinc par traitement pyrométallurgique ou hydrométallurgique. Certains concentrés contiennent de fortes proportions de plomb et ces métaux sont également récupérés. Le zinc est également associé au cadmium et les concentrés sont une source de ce métal.

Les concentrés de l'Union européenne étaient utilisés pour satisfaire plus de 45 % des besoins des raffineries européennes il y a 10 ans, mais elles en représentent maintenant moins de 25 %. Le déficit est compensé par des importations accrues, étant donné que la capacité de production minière augmente actuellement en Amérique du Nord, Australie et dans certains pays de l'Amérique du Sud.

Les matières premières secondaires telles que les résidus de galvanisation (cendres, résidus d'écoulement, boues, etc), les poussières émises par les aciéries et de la transformation du laiton et des déchets du moulage sous pression sont également des sources de zinc. La production de métal à partir des sources secondaires représentait plus de 8 % de la production de zinc affinée européenne totale en 1994. Le recyclage du zinc et des produits contenant du zinc est une question clé pour l'industrie.

1.5.1.3 Production et consommation

La production minière européenne est essentiellement représentée par l'Irlande et l'Espagne et s'élevait à 383 000 tonnes de concentrés de zinc en 1994. Ceci représentait une chute par rapport aux 397 000 tonnes produites en 1993, suite à l'épuisement des réserves et à des minerais de moindre qualité dans certaines exploitations minières. La production de métal a reculé au-dessous des 1,8 millions de tonnes qui avaient été dépassés en 1992, alors que la consommation du zinc affiné est passée de 1 640 000 tonnes à 1 770 000 tonnes, représentant 30 % de la demande en zinc dans les pays à économie de marché.

Pays	Production en 1992 (en millier de tonnes)	Production en 1993 (en millier de tonnes)	Production en 1994 (en millier de tonnes)
Canada	1325	1004	1008
Australie	1014	1007	928
Pérou	626	668	682
USA	551	513	601
Union européenne	500	411	383

Tableau 1.7: Production de concentrés de zinc [tm 36, Panorama 1997]

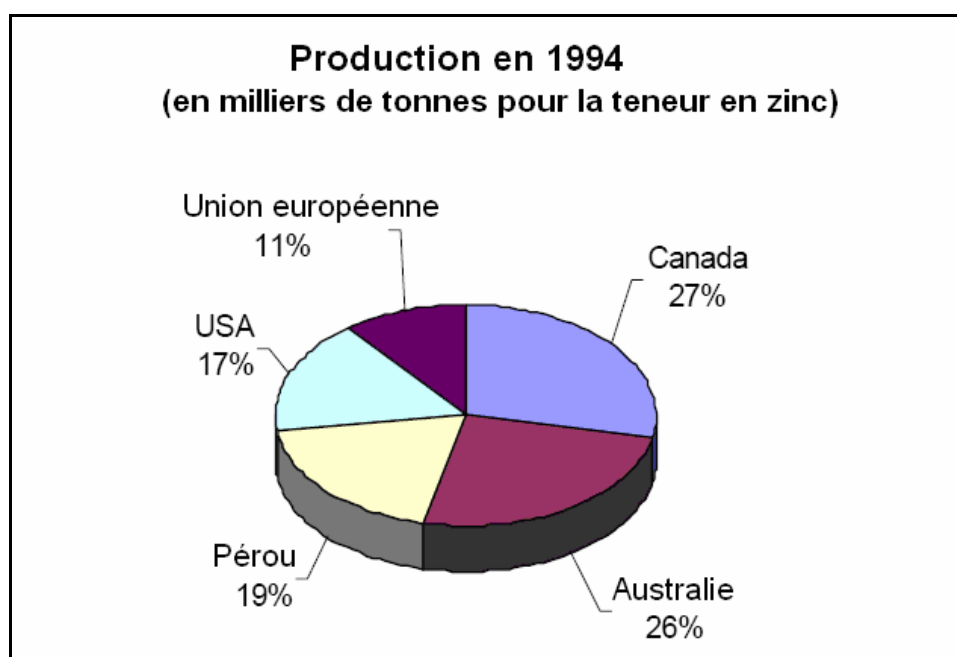


Figure 1.5: Production mondiale de zinc à partir de concentrés en 1994 [DANS FIGURE : en milliers de tonnes en teneur en zinc]

L'Union européenne se place comme leader mondial de la production de zinc, nettement devant le Canada et le Japon qui occupent les second et troisième rangs respectivement. En 1994, l'Europe a enregistré une production de 1 749 000 tonnes de métal, représentant presque 33 % du total des 5 376 000 tonnes des pays à économie de marché. L'Union européenne est également le principal consommateur de zinc parmi les pays à économie de marché. Les 1 770 000 tonnes de zinc consommées en 1994 devançaient de 49 % le second plus gros consommateur (USA) et de 145 % le troisième (Japon).

Pays	Production en 1992 (en millier de tonnes)	Production en 1993 (en millier de tonnes)	Production en 1994 (en millier de tonnes)
Union européenne	1844	1819	1749
Canada	672	662	693
Japon	729	696	666
USA	400	382	356
Australie	333	317	318
CEI		431	390

Tableau 1.8: Production de zinc affiné

1.5.1.4 Sites de production

Le zinc est produit par des procédés de grillage – lixiviation – extraction électrolytique et par l'ISF (Imperial Smelting Furnace) - procédé de distillation. Les tableaux suivants représentent l'emplacement géographique et les capacités de production des sites en Europe

Pays	Société	Lieu géographique	Procédé	Capacité (t/a)
Belgique	Union Minière	Balen-Wezel	E	200 000
Allemagne	Ruhr-Zink	Datteln	E	96 000
	MIM Hüttenwerke Duisburg	Duisburg-Wanheim	ISF-RT	100 000
	Metaleurop Weser Zink	Nordenham	E	130 000
Espagne	Asturiana de Zinc	San Juan de Nieva	E	320 000
	Española del Zinc	Cartagena	E	60 000
France	Union Minière France	Auby	E	220 000
	Metaleurop	Noyelles Godault	ISF-RT	100 000
Finlande	Outokumpu Zinc Oy	Kokkola	E	175 000
Italie	Enirisorse	Porte Vesme (Sardaigne)	ISF-RT	75 000
		Porte Vesme (Sardaigne)	E	100 000
	Pertusola Sud	Crotone (Calabre)	E	80 000
Pays-bas	Budelco (Pasminco)	Budel-Dorplein	E	210 000
Norvège	Norzink		E	140 000
Grande-Bretagne	Britannia Zinc (MIM Holdings)	Avonmouth	ISF-RT	105 000
Note: E = Unité électrolytique ISF = procédé Imperial Smelting Furnace RT = affinage au feu. Source: Statistiques industrielles				

Tableau 1.9: Producteurs européens leaders en termes de capacité annuelle, en 1994

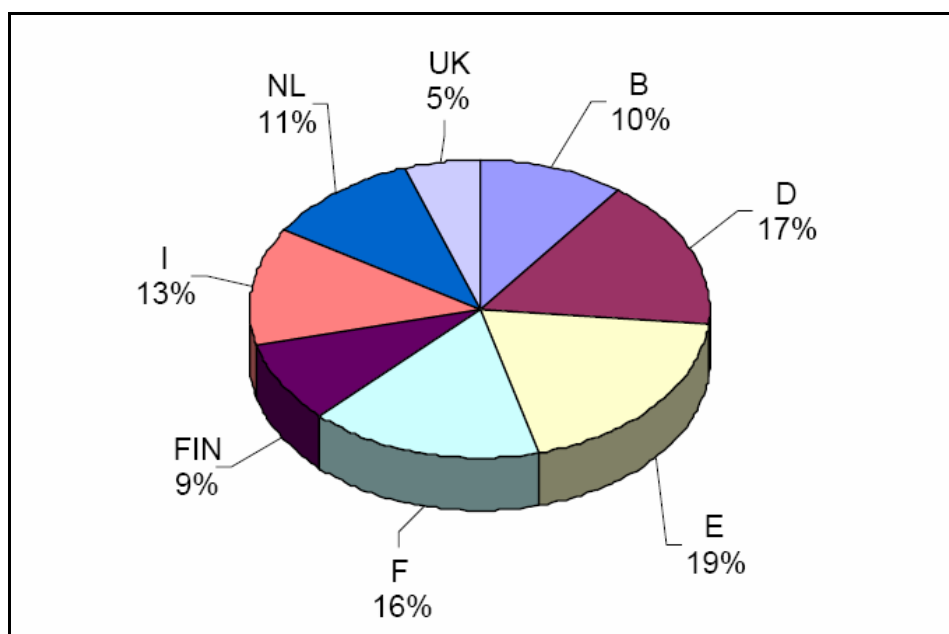


Figure 1.6: Production de zinc dans l'Union européenne (1994)

1.5.1.5 Problèmes environnementaux

Traditionnellement, le principal problème environnemental associé à la production du zinc à partir des sources primaires était l'émission de dioxyde de soufre dans l'air provenant du traitement par grillage et fusion des concentrés de soufre. Ce problème a été efficacement résolu par les fonderies européennes qui obtiennent maintenant une fixation élevée du soufre et produisent de l'acide sulfurique et du dioxyde de soufre liquide.

La lixiviation de la calcine et d'autres matériaux produit une solution qui contient du fer. L'élimination du fer se traduit par la production de quantités significatives de déchets solides qui contiennent toute une variété de métaux. La mise en décharge de ces déchets nécessite des normes très sévères de confinement et de surveillance.

Les émissions fugitives provenant du grillage et de la calcination sont également très importantes et doivent être prises en considération à toutes les étapes du procédé. Les émissions fugitives de brouillards acides provenant de l'extraction électrolytique du zinc en est un exemple particulier.

Le zinc et les produits contenant du zinc peuvent être largement recyclés. Les estimations basées sur la consommation historique et les cycles de vie des produits indiquent que l'on a atteint un taux de récupération de 80 % du zinc récupérable. Le système de recyclage du zinc est très avancé, non seulement pour le métal zinc, mais également sous différentes formes.

1.5.2 Plomb

1.5.2.1 Général

Le plomb [tm 36, panorama 1997] est le métal lourd le plus abondant dans la croûte terrestre et a été utilisé pendant plusieurs siècles. On le trouve sous forme de minerais sulfurés purs ou actuellement davantage sous forme de minerais mélangés où il est associé au zinc et à de petites quantités d'argent et de cuivre. Le plomb est un métal doux, il a un point de fusion bas et il est résistant à la corrosion. Ses propriétés lui confèrent une bonne valeur fonctionnelle, à la fois sous sa forme pure et également en tant qu'alliage ou composé.

Le plomb est classé selon la composition du produit, le tableau suivant reporte sa composition chimique selon les nouvelles normes européennes.

Qualité	Pb min	1 Bi max	2 Ag max	3 Cu max	4 Zn max	5 Ni max	6 Cd max	7 Sb max	8 Sn max	9 As max	Total de 1 à 9 max
PB990	99,990	0,010	0,0015	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,010
PB985	99,985	0,015	0,0025	0,0010	0,0002	0,0005	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,015
PB970	99,970	0,030	0,0050	0,0030	0,0005	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,030
PB940	99,940	0,060	0,0080	0,0050	0,0005	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,060

Note : La norme germanique DIN 1719 est la base de la nouvelle norme Européenne EN 12659

Tableau 1.10: Qualités de plomb

On assiste à des changements majeurs dans le modèle d'utilisation du plomb. L'industrie des batteries crée jusqu'à 70 % de la demande et est assez stable, alors que les autres utilisations du plomb qui comprennent les pigments et les composés, la protection contre les rayonnements, les produits laminés et extrudés pour l'industrie du bâtiment, le gainage des câbles, la grenaille et les additifs de l'essence sont en déclin.

Utilisation commerciale	1973 %	1983 %	1993 %	1994 %
Batteries	38	48	56	59
Produits chimiques	24	27	22	22
Produits semi-finis et moulés sous pression	17	17	16	16
Câbles	15	5	2,5	2,0
Alliages	2	3	11	0,8
Autres	4	-	1,6	0,2

Tableau 1.11: Utilisations du plomb dans le monde

1.5.2.2 Sources des matériaux

Le plomb affiné provient d'une matière primaire se présentant sous la forme de minerais et de concentrés de plomb, et d'une matière secondaire se présentant sous la forme de déchets et de résidus. La production primaire nécessite la fusion des minerais plombifères pour produire un lingot de plomb qui est ensuite affiné. L'économie de la production primaire à partir du minerai de plomb est liée aux teneurs en argent et zinc des gisements. La production du plomb nécessite de traiter la teneur en soufre des minerais pour produire de l'acide sulfurique. La plupart des fonderies de plomb primaire ont un procédé d'affinage complexe associé et des procédés associés pour récupérer la teneur d'argent sous forme d'alliage Ag-Au. L'affinage primaire est par conséquent lié à l'économie de l'exploitation des gisements de plomb-zinc. La teneur en zinc et en argent des minerais représente la source de profit principal.

L'Union européenne ne possède que quelques ressources minières de plomb mais la production de plomb est une grande et importante industrie. Durant ces 10 dernières années, la consommation et la production européenne n'ont subi qu'une modeste croissance, se traduisant par une diminution des parts de marché de l'Union européenne sur les marchés mondiaux.

L'industrie de l'affinage secondaire fournit maintenant plus de 50 % du plomb consommé. Les batteries au plomb que l'on trouve dans les voitures représentent la source principale de déchets pour l'affinage secondaire. L'industrie avance positivement pour favoriser le recyclage de ces batteries, cette proportion augmente avec l'augmentation du parc automobile mondial et le taux de retour des

vieilles batteries augmente. La production secondaire peut également nécessiter des unités d'affinage si les matières premières secondaires contiennent des composés non désirés.

1.5.2.3 Production et consommation

La production européenne de plomb est importante, se classant au premier rang parmi les pays à économie de marché avec 1 398 000 tonnes en 1994, dont 52 % étaient issus des matières secondaires. L'industrie répond à la préoccupation écologique en récupérant des quantités toujours croissantes de plomb de sorte que la production primaire est en déclin régulier.

L'Union européenne est la plus importante région productrice de plomb au monde, devant les États-Unis. En 1994, ces deux régions représentaient 59 % de la production affinée totale des pays à économie de marché avec 4,5 millions de tonnes. Le Royaume-Uni, l'Allemagne, la France et l'Italie sont les principaux producteurs et en moyenne 49 % de leur production est basée sur des matières secondaires. La moyenne de l'Union européenne avec 52 % est à cet égard considérablement inférieure à la moyenne américaine de 72 %, qui est la plus haute au monde, mais reste bien au-dessus de tout autre pays à économie de marché.

L'Union européenne se classe au second rang derrière les États-Unis en termes de consommation, avec 28 % de la consommation de plomb des pays à économie de marché en 1994, alors que la part des États-Unis avoisine les 30 %. Les quatre principaux états membres producteurs de l'Union européenne sont également les principaux marchés de consommation.

1.5.2.4 Sites de production

Dans l'Union européenne, on compte 7 fonderies/sociétés d'affinage primaires dont la capacité de production va de 40 000 tonnes par an à 245 000 tonnes par an. Les raffineries primaires sont principalement des multinationales, et sont dispersées au Royaume-Uni (Britannia refined metals), en France (Metaleurop), en Allemagne (Ecobat, Metaleurop), en Belgique (Union Minière) et en Italie (Enirisorse). Toutes les usines procèdent à la fusion du plomb et/ou des concentrés de plomb/zinc avant l'affinage des lingots de plomb et affinent également des lingots bruts provenant d'autres sources pour récupérer les métaux précieux. Britannia refined metals raffine également les lingots de plomb brut importés de sa maison mère MIM en Australie. A l'exception d'Union Minière, toutes ces raffineries primaires sont également impliquées dans le recyclage/affinage secondaire.

L'industrie secondaire est caractérisée par un grand nombre de plus petites raffineries, dont la plupart sont indépendantes. On trouve approximativement trente fonderies/raffineries secondaires dans l'Union européenne produisant de 5 000 à 65 000 tonnes par an. Elles recyclent et raffinent les déchets générés localement. Le nombre de ces raffineries diminue étant donné que les grandes sociétés multinationales et les groupes principaux de production de batteries achètent les plus petites unités secondaires ou organisent leurs propres opérations de recyclage.

Pays	Capacité annuelle des hauts fourneaux pour le plomb t/a	Capacité annuelle de fusion directe* t/a	Capacité annuelle des fours rotatifs secondaires t/a	Capacité d'affinage totale du plomb t/a
Autriche			32 000	32 000
Belgique	115 000		20 000	175 000
France	110 000		162 000	299 000
Allemagne	35 000	220 000	130 000	507 000
Grèce			12 000	12 000
Italie		90 000	125 000	235 000
Pays-bas			20 000	20 000
Espagne	14 000		62 000	76 000
Suède	50 000	65 000		155 000
Royaume-Uni		40 000 (capacité d'affinage 200 000 t/a)	107 000	307 000

Note :
* Matières premières primaires ou secondaires

Tableau 1.12: Capacités annuelles de production de plomb en Europe

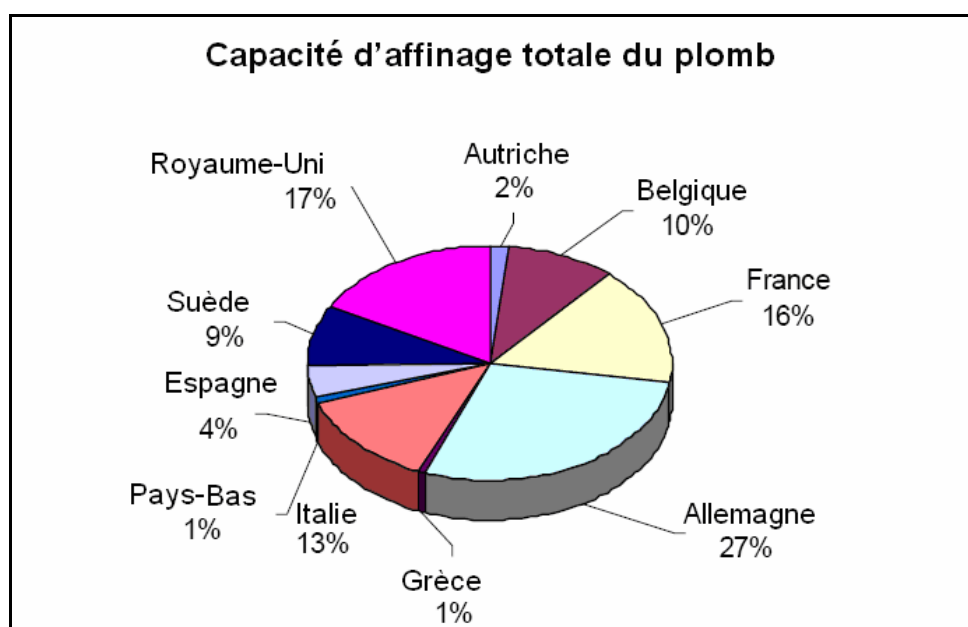


Figure 1.7: Capacité d'affinage européenne du plomb

1.5.2.5 Problèmes environnementaux

Traditionnellement, le problème environnemental principal associé à la production du plomb provenant des sources primaires était les émissions de dioxyde de soufre dans l'air provenant du grillage et de la fusion des concentrés sulfurés. Ce problème a été efficacement résolu par les fonderies de l'Union européenne qui ont obtenu une fixation élevée du soufre et produisent de l'acide sulfurique et du dioxyde de soufre liquide.

Les principaux problèmes environnementaux associés à la production du plomb secondaire sont également liés au rejet des gaz provenant des différents fours utilisés. Ces gaz sont épurés dans des filtres à manches ce qui permet ainsi de réduire les émissions de poussières et des composés métalliques. Il y a également potentiellement formation de dioxines à cause de la présence de petites

quantités de chlore dans les matières premières secondaires et on doit envisager la destruction des dioxines.

Le plomb est une préoccupation environnementale importante et de nombreux composés de plomb sont classés comme étant toxiques. La politique générale est normalement de limiter les émissions au niveau le plus bas possible étant donné l'état de la technologie, et il est normalement recyclé chaque fois que cela est approprié et économiquement viable. La plupart des mesures de contrôle concernent principalement l'exposition chez l'humain (les humains sont le plus affectés par l'exposition au plomb) bien qu'il existe certains cas dans lesquels les animaux peuvent être exposés au plomb dans l'environnement.

La législation environnementale demande d'investir pour réduire le niveau de plomb dans les émissions dans l'air. Ces dernières années, on a développé et mis en œuvre plusieurs nouvelles technologies qui proposent des méthodes plus efficaces pour faire fondre les concentrés de plomb. Ces procédés ont également des émissions réduites dans l'environnement. Les procédés existants ont été améliorés en utilisant des systèmes de dépollution et de contrôles modernisés.

Les batteries, qui représentaient 52 % de la consommation de plomb dans l'Union européenne en 1994, sont recyclées avec plus de 90 % d'efficacité.

Les réglementations concernant le plomb sont classées en trois catégories principales : l'exposition professionnelle, les émissions (qualité de l'air ambiant) et le contrôle de l'eau et des produits alimentaires. L'exposition professionnelle est traitée par la directive européenne 82/605/EEC du 28 juillet 1992 en matière de protection des travailleurs par rapport aux risques liés à l'exposition au plomb métallique et à ses composés ioniques sur le lieu de travail. Cette directive établit une limitation du niveau de plomb dans l'air sur le lieu de travail et sur certains indicateurs biologiques qui révèlent le niveau d'exposition des travailleurs. Les valeurs limites sont complétées par des règles concernant la production des employés à l'aide de vêtements de protection, de masques respiratoires, d'unités de lavage ou des règles spécifiques concernant la nourriture, les boissons, la façon de fumer, etc.

Le plomb dans l'atmosphère générale est limité par la directive 82/844/EEC du 3 décembre 1982, qui établit une limite pour les niveaux de plomb dans l'air dans toute l'Union européenne. Ces valeurs limites sont actuellement révisées. Les niveaux de plomb dans l'eau sont également contrôlés par un certain nombre de directives concernant l'eau en fonction de son type et de son utilisation, par exemple l'eau prévue pour la consommation des êtres humains, l'eau pour se laver, les eaux de pêches, etc.

1.5.3 Cadmium

1.5.3.1 Général

Le cadmium appartient au sous-groupe du zinc de la table périodique et a été découvert par Strohmeyer en 1817 pendant une étude sur le ZnCO_3 . Il est associé au zinc dans les minerais selon un rapport de 1:200 Cd sur Zn. Il est physiquement similaire au zinc tout en étant plus dense, plus doux et peut être poli. Contrairement au zinc, il est également résistant aux alcalis. De part ses bonnes capacités d'absorption des neutrons, le cadmium est souvent utilisé dans les réacteurs nucléaires.

Ces composés présentent un état d'oxydation de 2+. Le cadmium est largement diffusé dans le monde avec une teneur comprise entre 0,1 et 1 ppm dans la couche de terre superficielle.

1.5.3.2 Source des matériaux

Il n'y a que peu de minerais de cadmium, tel que le Greenockite (CdS) ou Otavite (CdCO_3) et CdO . Aucun de ces minerais ne représente une importance industrielle. Les minerais de zinc, qui contiennent du cadmium en tant que composé isomorphe à des concentrations d'environ 0,2 %, représentent un intérêt économique pour la récupération du cadmium. De plus, les minerais de plomb et de Cu peuvent contenir de petites quantités de cadmium.

1.5.3.3 Production et consommation

Contrairement aux autres métaux lourds, le cadmium a été affiné et utilisé que très récemment ; la production et l'utilisation n'ont progressé que ces 40-50 dernières années. Les utilisations principales actuelles sont :

- les dépôts électrolytiques à base de cadmium,
- les batteries de nickel-cadmium,
- certains pigments et stabilisateurs pour les plastiques,
- les alliages pour les soudures, la protection contre l'incendie, les tiges de commande dans les réacteurs nucléaires, les conducteurs électriques.

On en utilise de petites quantités pour les piles solaires.

Depuis 1970, la production de cadmium dans les pays occidentaux est restée assez constante, comprise entre 12 000 et 16 000 t/an. La production mondiale se situe autour de 20 000 t/an. L'utilisation du cadmium dans différentes applications s'est modifiée depuis 1970 et a été affectée par des facteurs techniques, et environnementaux. Ceci a influencé les prix du métal. Les prix du métal dans les années 70 atteignaient 3 US \$/lb, et dans les années 80 étaient compris entre 1,1 et 6,9 US \$/lb. Depuis cette époque, le prix du cadmium se situe à 1 US \$/lb et a même été aussi bas que 0,45 US \$/lb, ce qui équivaut au niveau du prix du zinc.

Les principaux pays utilisateurs et producteurs sont reportés dans le tableau suivant.

Pays	Production t/a	Utilisation t/a
Canada	2832	107
Japon	2357	6527
Belgique	1579	2017
République populaire de Chine	1300	600
États-Unis	1238	1701
Allemagne	1145	750
Finlande	600	-
France	205	1276

Tableau 1.13: Producteurs et utilisateurs principaux de cadmium en 1996

Le cadmium est récupéré: -

- du procédé de production pyrométallurgique de Pb-Cu à partir des poussières de gaz émises par l'opération de fusion.
- du procédé de production pyrométallurgique de Pb-Zn à partir des poussières de gaz émises par l'opération de frittage/grillage et du zinc brut.

Les poussières émises sont généralement lixiviées avec H_2SO_4 pour séparer le cadmium qui est ensuite précipité sous forme $CdCO_3$ ou réduit en éponge de cadmium avec plus de 90 % de cadmium. L'éponge peut être fondue sous forme NaOH, ou distillée sous vide, ou dissoute et électrolysée pour produire du cadmium à haute pureté [$\geq 99,99$ % de cadmium].

Le zinc brut peut être distillé dans des colonnes New Jersey pour produire du zinc pur et un alliage Cd-Zn avec plus de 60 % de cadmium. L'alliage Cd/Zn issu de l'opération de distillation en colonnes New Jersey doit être distillé deux fois avant de produire du cadmium pur.

Le recyclage existe, mais seules très peu de sociétés y participent. On recycle principalement les batteries usagées pour récupérer le cadmium et Ni.

1.5.3.4 Problèmes environnementaux

Le statut des composés de cadmium a un impact significatif sur l'évaluation des émissions et le nickel figure dans la liste de la directive 76/464, directive sur les substances dangereuses pour l'eau - liste II. Un groupe de travail technique mandaté dans le cadre de la directive 96/62/EC relative à l'Evaluation et la Gestion de la Qualité de l'Air, développe une norme concernant la qualité de l'air environnemental pour le cadmium. Ces facteurs doivent être pris en compte.

Le cadmium s'est réparti de manière omniprésente dans l'environnement naturel depuis des millions d'années. La production industrielle n'a affecté la répartition totale que de manière insignifiante, mais on a assisté à certains problèmes environnementaux dans certaines régions spécifiques. Un procédé de production typique du zinc peut produire 600 tonnes par an de cadmium. La production de cadmium est étroitement contrôlée pour empêcher les émissions fugitives et supprimer les poussières selon une norme très stricte.

Plus de 90 % de l'imprégnation en cadmium de la population non fumeuse se feraient par la nourriture. Par conséquent, la contamination par le cadmium des sols cultivés doit être réduite et contrôlée. Les valeurs d'émission limites pour le cadmium dans l'air sont $< 0,2 \text{ mg/Nm}^3$ et pour l'eau $< 0,2 \text{ mg/l}$.

L'effet négatif du cadmium est l'acidose tubulaire rénale. L'endommagement tubulaire est irréversible, donc la prévention est plus importante que le diagnostic. La longue demi_vie biologique du cadmium peut conduire à une augmentation continue des niveaux dans les reins sur plusieurs années et ainsi l'exposition passée est souvent plus importante que l'exposition présente.

Dans de nombreuses applications, les alliages de cadmium sont indispensables et ne peuvent pas être remplacés par d'autres matériaux. De même, l'utilisation du cadmium dans les batteries rechargeables peut également être un bénéfice pour l'environnement.

1.6 Métaux précieux

1.6.1 Général

Les métaux précieux [tm 36, panorama 1997] comprennent les métaux bien connus tels que l'or et l'argent ainsi que les six métaux du groupe du platine : le platine, le palladium, le rhodium, l'iridium, le ruthénium et l'osmium. Leur rareté et leur résistance à la corrosion leur valent leur dénomination de métaux précieux.

L'Union européenne possède la plus grande capacité d'affinage et de fabrication en matière de métaux précieux dans le monde, même si ses ressources minérales actuelles pour de tels métaux sont très limitées. Le recyclage des métaux précieux issus des déchets et des résidus industriels a toujours représenté une source importante de matières premières pour l'industrie européenne.

La consommation de l'or dans l'Union européenne est principalement destinée à la joaillerie, avec de plus petites quantités utilisées pour l'électronique et pour d'autres applications industrielles et décoratives. Les principaux utilisateurs d'argent sont les industries de la photographie et de la joaillerie. Les métaux du groupe du platine sont très utilisés en tant que catalyseurs et le fait d'imposer des limites d'émissions strictes sur les véhicules vendus dans l'Union européenne a stimulé leur utilisation pour les pots catalytiques.

1.6.2 Sources des matériaux

Les mines dans le monde entier envoient de grandes quantités de métaux précieux, sous forme de minerai brut ou de sous-produit, aux raffineries européennes. Les raffineries avec des capacités significatives d'affinage de métaux précieux se trouvent en Belgique, en Allemagne, en Suède, en Finlande et au Royaume-Uni. Elles récupèrent typiquement les métaux précieux des minerais de plomb et zinc, de cuivre ou de nickel, ainsi que des déchets de faible qualité de tout type, et elles fournissent les métaux purs en barres ou en plaques, en grains ou en éponges.

Il existe des petits gisements de minerais de métaux précieux en Europe, le tableau suivant reporte les ressources primaires en 1997. Ces ressources représentent approximativement 4,5 % de l'argent primaire mondial, 1,1 % de l'or primaire mondial et 0,08 % des PGM primaires mondiaux. Des gisements d'or ont été développés en Grèce et leur contribution sera significative ces prochaines années.

Pays	Argent t/an	Or t/an	PGM t/an
Finlande	11,0	1,0	0,1
France	0,1	5,7	
Grèce	1,2		
Irlande	0,4		
Italie	0,3		
Portugal	1,1		
Espagne	6,2	5,4	
Suède	8,8	6,3	

Tableau 1.14: Ressources primaires de métaux précieux en 1997

L'Europe abrite un certain nombre de sociétés qui se spécialisent dans la collecte, le prétraitement et la commercialisation des déchets et des matières secondaires en amont des véritables étapes de test et d'affinage. Les articles typiques sont les cartes de circuit imprimé usagées, les ordinateurs obsolètes, les anciennes pellicules photographiques, les plaques de protection de rayon X ainsi que les solutions, les bains électrolytiques usagés, etc.

1.6.3 Production et consommation

Le coût de la récupération et du recyclage est plus que justifié par la valeur intrinsèque élevée des métaux précieux contenus dans ces déchets et résidus. L'aspect économique favorise le recyclage des métaux précieux mais également les problèmes environnementaux pour lesquels on définit des valeurs limites plus strictes concernant la teneur en métal tolérable des déchets jetés.

L'affinage de l'or, de l'argent et des métaux du groupe du platine dans l'Union européenne a lieu au niveau de sociétés spécialisées dans l'affinage et la fabrication des métaux précieux, ou dans des raffineries des métaux de base. La capacité totale d'affinage des métaux précieux des sociétés de l'Union européenne est la plus importante au monde.

Pays	Argent t/an	Or t/an	PGM t/an
Autriche	190	70	1
Belgique	2440	60	45
France	1520	135	12
Allemagne	2700	193	92
Italie	1050	115	15
Luxembourg			
Pays-bas	130	15	1
Espagne	830	30	5
Suède	250	15	1
Royaume-Uni	2320	300	100
Suisse	620	565	14
Autres pays de l'UE	50	10	5

Tableau 1.15: Capacité annuelle des raffineries européennes (tonnes)

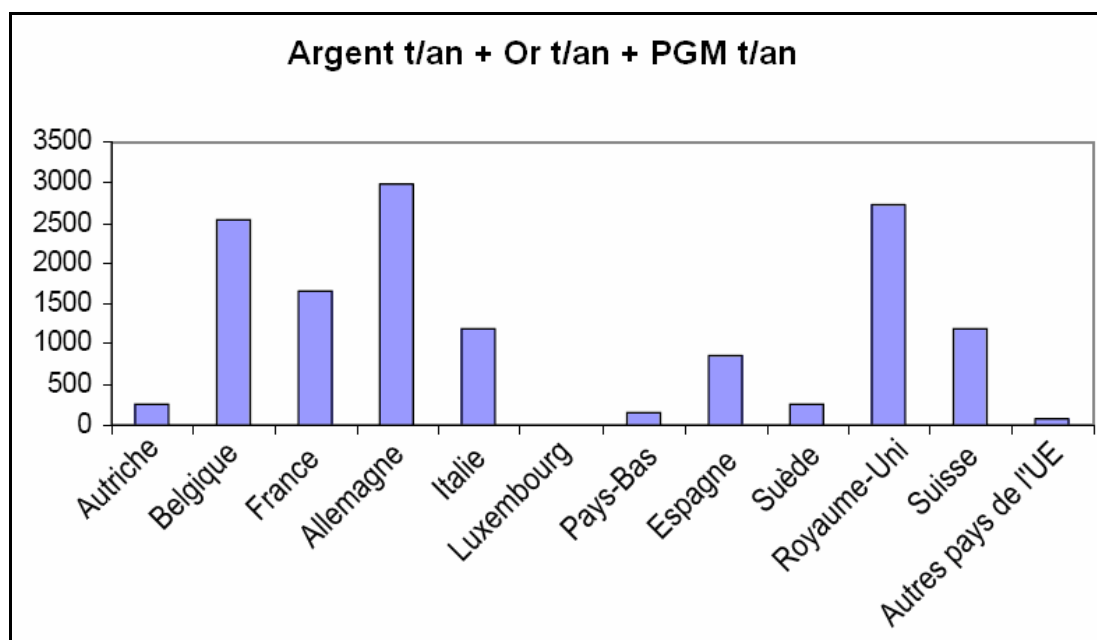


Figure 1.8: Capacité totale européenne d'affinage des métaux précieux

On peut maintenir une rotation rapide du métal produit étant donné que la capacité de raffinage représente approximativement le double de la quantité véritablement produite.

La fabrication de la plupart des métaux précieux est relativement facile que ce soit sous la forme de métaux purs ou d'alliages. En particulier, l'or est habituellement facile à transformer en alliage

spécifique pour la joaillerie ou pour les applications dentaires afin d'améliorer sa résistance à l'usure ou sa couleur. En raison de la valeur intrinsèque élevée et de la grande plage de formes et d'alliages nécessaire, de tels métaux sont habituellement fabriqués ou traités en quantités relativement petites par rapport aux métaux de base. Le nitrate d'argent pour l'industrie photographique est l'un des quelques produits relatifs aux métaux précieux fabriqués dans des quantités de l'ordre de la tonne.

La demande européenne pour les métaux précieux est élevée. Le commerce de la joaillerie est le plus gros consommateur d'or et le commerce de la photographie est le plus gros consommateur d'argent. La plus grande consommation de platine concerne la production des catalyseurs pour automobile. Les autres utilisations principales se rencontrent dans les produits chimiques, la dentisterie et la finance telle que la frappe de la monnaie. Le tableau ci-dessous indique la demande en 1996 pour les métaux précieux.

	Argent t/an	Or t/an	PGM t/an
Demande européenne totale	5710	881	85
Demande mondiale totale	19600	2621	360

Tableau 1.16: Demande de métaux précieux en 1996

1.6.4 Sites de production

Les principaux affineurs et fabricants de métaux précieux de l'Union européenne travaillent à l'échelle internationale et sont les leaders mondiaux dans leur domaine. Les noms principaux sont Degussa et Heraeus en Allemagne et Johnson Matthey au Royaume-Uni. La société américaine de métaux précieux Engelhard Corporation, a travaillé en Europe pendant un certain nombre d'années, et en 1994 a annoncé une joint venture avec la société française de métaux précieux CLAL.

Les principaux raffineurs européens de métaux de base avec une importante implication dans les métaux précieux comprennent Union Minière en Belgique, Norddeutsche Affinerie en Allemagne, Outokumpu en Finlande et Boliden en Suède.

1.6.5 Problèmes environnementaux

Les raffineries européennes de métaux précieux représentent une industrie de haute performance à technologie avancée qui est très concentrée sur la recherche et le développement. Les procédés utilisent souvent des réactifs dangereux tels que HCl, HNO₃, Cl₂ et des solvants organiques. Les procédés utilisés sont techniquement avancés et permettent de limiter les pertes en métaux, et la petite échelle de production permet d'utiliser efficacement ces techniques pour réduire et traiter les émissions potentielles. Ceci englobe non seulement les nouvelles utilisations pour les métaux précieux mais également la découverte de techniques pour économiser les quantités de métaux précieux utilisés dans les applications existantes. Les matières premières sont soumises à un prélèvement et des essais intensifs et les déchets de procédé sont analysés selon la même norme.

La récupération de ces métaux issus des matières premières secondaires est particulièrement importante et bon nombre de ces matériaux sont classés comme des déchets provenant d'autres industries. Il y a des retards dans le transport des matières premières en raison de la législation concernant le transport transfrontalier des déchets et ceci peut être un obstacle au recyclage.

1.7 Mercure

1.7.1 Général

Le mercure est le seul métal qui est liquide à température ambiante, et qui a les points de fusion et d'ébullition les plus bas de tous les métaux. Il a également une conductivité électrique élevée et ces caractéristiques sont utilisées dans toute une variété d'applications telles que la production de piles et des dispositifs de commutation électrique. Le mercure forme facilement des alliages avec un certain nombre d'autres métaux, connus sous le nom d'amalgames, qui sont très utilisés en dentisterie. L'utilisation principale du mercure est en tant que cathode liquide dans le procédé de production du chlore et de la soude. Ce procédé exploite la haute conductivité du mercure et la formation d'un amalgame avec le sodium.

Le mercure est caractérisé par la toxicité du métal et de ses vapeurs et par l'extrême toxicité de certains de ses composés. Il en résulte que le mercure est remplacé par des matériaux alternatifs dans la plupart de ses utilisations et donc la demande et la production du mercure ont rapidement décliné. Il existe des implications dans le futur étant donné qu'il est probable que certains stocks existants de mercure soient introduits sur le marché ou puissent même devenir des déchets.

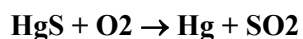
1.7.2 Sources des matériaux

Le mercure apparaît dans la nature sous la forme de cinabre (sulfure de mercure), qui est associé à des gangues très dures telles que la quartzite et les basaltes. Il se présente également sous la forme d'autres composés tels que des oxydes, des sulfates, des chlorures, des sélénures. Ceux-ci sont rares et sont toujours associés au cinabre et ont généralement un faible intérêt. Il existe des exceptions telles que la livingstonite (HgSbS) qui a été utilisée au Mexique. La qualité des minerais primaires varie considérablement de 0,1 % de mercure à plus de 3 %.

Les autres sources de mercure sont les minerais et les concentrés d'autres métaux tels que le cuivre, le plomb et le zinc, etc. Le mercure est produit par la purification des gaz émis pendant la production de ces métaux. Le mercure est également récupéré des matières secondaires telles que les amalgames dentaires et les piles, et est également obtenu du raffinage de pétrole.

1.7.3 Production et consommation

La décomposition du cinabre est complète à des températures de 600°C, représentée par la formule ci-dessous. Le métal mercure est condensé à température ambiante. Le chauffage peut être réalisé dans des fours « Herreschoff », à moufle ou rotatifs. Les deux derniers ne sont pas utilisés très souvent.



Source	Teneur en mercure dans le minerai (%)	Production (t/an)
Almaden, Espagne	> 3	390
Mc Dermitt, USA	0,5	
Nikitovska, Ukraine	0,1	

Tableau 1.17: Sources de mercure

Dans le cas des minerais riches, au-dessus de 2 % de mercure, seul le prétraitement par broyage et séparation granulométrique est nécessaire, et le minerai broyé peut alors être directement introduit dans le four. Dans le cas des minerais pauvres avec 0,5 % de mercure, la flottaison différentielle est utilisée pour séparer les pierres de silice afin d'obtenir des concentrés avec une teneur en mercure

moyenne de 70 %. Pour les minerais contenant moins de 0,1 % de mercure, le minerai est grillé après broyage. On utilise des fours à grande capacité (1 000 tonnes par jour).

La production du mercure issue de la production des autres métaux non-ferreux en Europe en 1997 est estimée à 350 tonnes. Ces procédés produisent généralement du mercure ou calomel de 0,2 à 0,8 kg de mercure par tonne de métal produit en fonction de la teneur en mercure du concentré.

On peut observer le déclin de la production du mercure dans la production européenne, pour 1960, 1970 et 1980.

Année	Production (t/an)
1960	4250
1970	3700
1980	1100

Tableau 1.18: Production de mercure en Europe de l'ouest

1.7.4 Problèmes environnementaux

La toxicité du mercure et de ses composés est un facteur significatif. Le mercure dans l'environnement peut interagir avec différents composés organiques qui produisent des composés organo-mercuriels très toxiques. La législation en vigueur impose par conséquent des normes très strictes concernant l'industrie pour empêcher les émissions, pour réduire son utilisation dans différents procédés et pour supprimer le mercure de l'environnement.

Le mercure est une substance de la liste 1 de la directive 76/464 concernant la pollution, couverte par la section « Substances dangereuses déversées dans l'environnement aquatique de la communauté ». La directive 84/156 définit des valeurs limites de déversement pour le mercure à l'échelle de l'UE.

1.8 Métaux réfractaires

1.8.1 Général

Le terme « métaux réfractaires » concerne un groupe de métaux (dans certains cas des terres rares) qui peuvent être principalement caractérisés par les mêmes propriétés physiques. Ces propriétés, sont pour la majeure partie des métaux réfractaires, un point de fusion élevé, une densité élevée, des propriétés électriques spéciales, un caractère inerte, et en particulier la capacité à conférer en petites quantités à l'acier et à d'autres métaux, des améliorations exceptionnelles de leur propriétés physiques. Une sélection de propriétés physiques de certains métaux réfractaires sont reportées ci-dessous.

Métal	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)	Densité (g/cm ³)
Chrome	Cr	24	51,99	1857	2672	7,19
Manganèse	Mn	25	54,94	1220	2150	7,44
Tungstène	W	74	183,85	3410	5900	19,3
Vanadium	V	23	50,94	1929	3450	6,11
Molybdène	Mo	42	95,94	2610	5560	10,22
Tantale	Ta	73	180,95	2996	5425	16,65
Titane	Ti	22	47,88	1725	3260	4,5
Niobium	Nb	41	92,90	2468	4927	8,57
Rhénium	Re	75	186,2	3180	5900	21,02
Hafnium	Hf	72	178,4	2230	4602	13,09
Zirconium	Zr	40	91,22	1857	3580	6,5

Tableau 1.19: Propriétés physiques des métaux réfractaires

Les métaux réfractaires et les poudres de métal dur sont utilisés sur une grande plage d'applications industrielles. Le chrome est important pour les alliages d'acier et en tant que revêtement métallique dans l'industrie galvanique. Parmi toute une variété d'autres utilisations comme l'alliage de l'acier, le manganèse est le composant clé de certains alliages d'aluminium très utilisés, et est utilisé sous la forme d'oxyde dans les piles sèches [tm 174, T.S. Jones USGS 1997]. La plus grande utilisation du tungstène se fait sous forme de carbures cimentés, qui sont également appelés métaux durs. Les carbures cimentés sont des matériaux résistants à l'usure utilisés pour le travail des métaux, l'exploitation minière et l'industrie de la construction. Les fils métalliques, les électrodes et/ou des contacts en tungstène sont utilisés dans des applications électroniques de l'éclairage, de chauffage et de soudage [tm 175 K.S. Shedd USGS 1997]. Le molybdène est utilisé en tant que métal réfractaire dans de nombreuses applications chimiques, comprenant les catalyseurs, les lubrifiants et les pigments [tm 176, J.W. Blossom USGS 1997]. Le tantale et son élément jumeau le niobium sont utilisés en tant que poudre et carbures de tantale et de niobium. La poudre de tantale est principalement utilisée pour la production des condensateurs au tantale.

Le niobium et le columbium sont des synonymes pour le même élément. Le columbium était le premier nom donné, et le niobium a été le nom officiellement donné par l'Union internationale de la chimie pure et appliquée en 1950 [tm 172, L.D. Cunningham USGS 1997]. En tant que métal, le titane est bien connu pour sa résistance à la corrosion et pour son rapport résistance / poids élevé. Cependant, environ 95 % du titane est consommé sous la forme de dioxyde de titane (TiO₂), un pigment blanc dans les peintures, le papier et les matières plastiques [tm 177, J. Gambogi USGS 1997]. Le Rhénium est utilisé dans les catalyseurs de reformage de pétrole pour la production des hydrocarbures à teneur élevée en octane, qui sont utilisés dans la production de l'essence sans plomb [tm 178, J.W. Blossom USGS 1997].

Le zirconium est le 18ème élément le plus abondant sur la croûte terrestre avec une abondance cristalline moyenne de 165 parties par million. Martin Heinrich Klaproth a découvert l'élément en 1789

en analysant le zircon. Le zirconium dépourvu d'hafnium est utilisé en tant que placage pour les tiges de combustible nucléaire. Le zirconium de qualité commerciale, contrairement à celui de qualité nucléaire, contient de l'hafnium et est utilisé dans l'industrie chimique en raison de son excellente résistance à la corrosion. L'hafnium est un élément métallique brillant, ductile, couleur argent métallisé avec un point de fusion très élevé. Le métal hafnium a tout d'abord été produit en 1925 par Anton Edward van Arkel et Jan Hendrik de Boer en passant du tétrachlorure d'hafnium sur un filament en tungstène. L'hafnium est utilisé dans les tiges de commande nucléaires en raison de sa section efficace pour l'absorption des neutrons thermiques [tm 179, J.B. Hedrick USGS 1997]. Les autres applications des métaux réfractaires comprennent l'utilisation en tant qu'éléments de mélange pour la production des céramiques contenant du métal.

En raison de leur nature réfractaire, les métaux sont parfois produits de différentes manières à partir de métaux plus communs. La production nécessite généralement des méthodes hydrométallurgiques pour l'extraction et la purification [tm 8, HMIP 1993] et la réduction de l'hydrogène et la carburation pour la production de poudre de métal dur et de carbures de métal dur. Les métaux réfractaires bruts et les poudres métalliques ont souvent recours aux techniques métallurgiques des poudres afin de produire des produits finis ou semi-finis.

Les procédés pour fabriquer les métaux réfractaires qui comprennent la production des poudres de métal dur et des carbures métalliques couvriront les métaux de chrome, manganèse, tungstène, vanadium, molybdène, titane, tantale, niobium, rhénium ainsi que la production de zirconium et d'hafnium.

1.8.2 Sources des matériaux

Les métaux réfractaires peuvent être produits à partir de toute une variété de matières premières primaires et secondaires. Les métaux réfractaires sont produits à partir de matières premières primaires par un traitement hydrométallurgique des minerais et des concentrés oxydés et soufrés et par la réduction de l'hydrogène et la carburation supplémentaires afin de produire des carbures cémentés.

La production provenant de matières premières secondaires est normalement basée sur les déchets de métal dur et les résidus provenant d'autres procédés de production comme les catalyseurs usagés. Le fait que le recyclage joue un rôle important peut être démontré par le fait qu'environ 30 % de l'approvisionnement mondial en tungstène sont produits à partir de matières premières secondaires. L'industrie du tungstène peut traiter presque chaque type de déchets contenant du tungstène pour récupérer le tungstène, et d'autres composés de valeur s'il y en a.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des matières premières primaires et secondaires les plus importantes qui sont utilisées pour la production des métaux réfractaires. Il donne également une information concernant les gisements de minerais dans l'Union européenne.

On utilise également un certain nombre d'autres matières premières, telles que le coke, le charbon, le charbon de bois, le silicium, l'aluminium, le calcium et le magnésium en tant que réducteurs. Différents produits chimiques, par exemple l'acide sulfurique sont nécessaires pour de la lixiviation, la purification, la précipitation, l'échange d'ions et les opérations électrolytiques.

Métal	Matière première primaire (ressources)				Matière première secondaire
	Minéraux	Teneur	Autres métaux	Gisements en Europe	
Chrome	Chromite	Cr < 50%	Fe, Mg, Al	Finlande et Grèce	• Déchets de chrome
Manganèse	Pyrolusite Braunite Manganite Psilomélane	Mn 63% Mn 66% Mn 62% Mn 45 – 60%	Si Ba	Grèce ² et Italie ²	
Tungstène	Wolfram Scheelite Ferbérite Hubnérite	WO ₃ 76% WO ₃ 80% WO ₃ 76% WO ₃ 76%	Fe, Mn Ca Fe Mn	Autriche, France, Portugal et Royaume-Uni	• Déchets de tungstène (copeaux de meule) • Déchets de métal dur
Vanadium	Titanomagnétite Montroséite Corvusite Roscoélite	V 1,5% V 45% V 40% V < 14%	Fe, Al, Ti, Cr Fe Al, Si		• Cendres sous chaudière • Cendres volantes des incinérateurs • Catalyseurs usés de l'industrie pétrochimique et chimique • Déchets (sels) provenant de la production d'alumine
Molybdène	Molybdénite Wulfénite Powellite Ferrimolybdite Chalcopyrite ⁴		Re Pb Ca, W Fe Cu		• Catalyseurs usés de l'industrie du pétrole contenant du molybdène
Titane	Rutile Ilménite Leucoxène Laitier riche en TiO ₂ issu de l'ilménite	TiO ₂ 94% TiO ₂ < 70% TiO ₂ 80%			• Déchets de titane principalement issus de la production des produits semi-finis • Copeaux de titane
Tantale	Tantalite Wodginité Microlite Columbite (Cassitérite) ⁵	Ta ₂ O ₅ 42 – 84% Ta ₂ O ₅ 60 – 70% Ta ₂ O ₅ 1 – 40%	Fe, Mn, Nb Nb, Sn, Mn, Fe Na, Ca, Nb Fe, Mn, Nb		• Copeaux de tantale métalliques non oxydés • Anodes en tantale • Condensateurs agglomérés • déchets de tantale oxydés liés aux autres métaux oxydés • Anodes en tantale recouvertes avec du manganèse oxydé
Niobium	Tantalite Columbite Microlite	Nb ₂ O ₅ 2-40% Nb ₂ O ₅ 40-75%	Fe, Mn, Ta Fe, Mn, Ta Na, Ca, Ta		• Déchets de métal dur
Rhénium	Molybdénite		Mo		• Catalyseurs de platine-rhénium utilisés dans l'industrie du pétrole
Zirconium	Zircon ₆		Hf		
Hafnium	Zircon ₆		Zr		

Note :
¹ La liste n'est pas exhaustive, elle ne donne qu'une vue d'ensemble des Sources des matériaux les plus importantes.
² Les gisements de manganèse en Grèce et en Italie contiennent des minéraux de moindre qualité et ne sont utilisés que de temps en temps.
³ Les gisements de titanomagnétite porteur de vanadium sont d'origine magmatique et on les trouve dans plusieurs régions du monde [tm 107, Ullmanns 1996]. A partir du minerai de titanomagnétite, on peut produire un laitier de vanadium, qui est la première source pour produire des composés de vanadium.
⁴ Concentré de sulfure de cuivre – molybdène qui est utilisé en tant que minerai secondaire.
⁵ La production d'étain issue du minerai de cassitérite conduit à un laitier contenant du tantale et du niobium, qui est une source principale de matière première de la production de tantale et de niobium.
⁶ Parfois le zirconium et le hafnium sont des sous-produits issus des gisements de sable, qui contiennent toujours du titane et d'autres métaux de terre rares.

Tableau 1.20: Matières premières primaires et secondaires pour la production des métaux réfractaires

1.8.3 Production et consommation

La production et le marché des métaux réfractaires européens dans le monde sont très sensibles à la situation politique et économique des pays producteurs de matières premières. La consommation mondiale du tungstène primaire par exemple, était forte en 1997, et est restée bien au-dessus de la production minière mondiale. Un ratio estimé de un tiers des approvisionnements mondiaux provenait des stocks situés en Russie et au Kazakhstan. Les stocks ont inondé le marché et ont maintenu le prix du tungstène primaire au-dessous du coût de fonctionnement de la plupart des mines. Par conséquent, de nombreuses mines ont fermé, et la capacité de production mondiale de tungstène a chuté aux environs de 75 % de la consommation mondiale. La Chine continue également à être un sérieux concurrent en cas d'augmentation de leur production de métaux réfractaires. Cependant, en raison des propriétés avantageuses des métaux réfractaires et de la compréhension croissante de la façon d'utiliser les métaux réfractaires, la production augmentera au moins à long terme. En ce qui concerne la future consommation de tungstène, les carbures cimentés par exemple, on estime que le plus grand secteur d'utilisation finale augmentera de plus de 5 % sur la base de 1998 [tm 175, K.B. Shedd USGS 1997]. La production mondiale du chrome est présentée dans le tableau suivant.

Pays	Capacité de production (t/an)
Brésil	500
Chine	4 000
France	7 000
Allemagne	1 000
Inde	500
Japon	1 000
Kazakhstan	1 000
Russie	13 000
Royaume-Uni	10 000
USA	3 000

Tableau 1.21: Capacité de production mondiale de métal chrome [tm 173, J.F. Papp USGS 1997]

1.8.4 Site de production

La production des métaux réfractaires dans l'Union européenne est assurée par un nombre limité de sociétés. Deux sociétés principales se partagent la production du chrome. Il s'agit de London and Scandinavian Metallurgical Co Limited qui dirige une nouvelle usine moderne de chrome construite en 1997, et Delachaux en France, qui vient juste d'annoncer l'achèvement de son usine de chrome à Valenciennes.

Les sociétés suivantes, Kennametal Hertel AG, Widia GmbH et HC Stark GmbH en Allemagne, Treibacher Industrie AG et Plansee GmbH en Autriche, Sandvik et Seco Tools en Suède et Eurotungstène Poudres en France [tm 1982, ITIA 1999] produisent des poudres métalliques et des carbures de tungstène en Europe.

Les sociétés mentionnées ci-dessus pour la production des poudres métalliques de tungstène produisent certains autres métaux réfractaires. Un panorama des plus grandes sociétés productrices de tantale et de niobium au monde et de leurs produits est reportée dans le tableau 1.22. Malheureusement, il n'y a pas d'information concernant les producteurs chinois et par conséquent ils ne figurent pas dans le tableau.

Pays	Société	Produits (N 1)
Autriche	Treibacher Chemische Werke AG	Oxyde de Nb et Ta/carbure, FeNb, NiNb
Brésil	Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineracao (CBNM)	Oxyde/métal Nb, FeNb, NiNb
	Cia. Industrial Fluminense (N 2)	Oxyde de Nb et Ta
	Mineracao Catalao de Goias S.A (Catalao)	FeNb
Canada	Cainbior Inc., et Teck Corp. (Niobec)	FeNb
Estonie	Silmet	Oxyde/métal de Nb
Allemagne	Gesellschaft für Elektrometallurgie mbH (GFE) (N 2)	FeNb, NiNb. Oxyde/métal/carbure de Nb et Ta, sel de potassium, FeNb, NiNb, poudre de condensateur de Ta
Japon	Mitsui Mining & Smelting Co	Oxyde/métal/carbure de Nb et Ta
	Showa Cabot Supermetals (N 3)	Poudre de condensateur de Ta
	H.C Stark-V Tech Ltd (N 4)	Poudre de condensateur de Ta
Kazakhstan	Ulba Metallurgical	Oxyde/métal de Ta
	Irtysk Chemical & Metallurgical Works	Oxyde/métal de Nb
Russie	Solikamsk Magnesium Works	Oxyde de Nb et Ta
Thaïlande	H.C Starck (Thaïlande) Co. Ltd (N 4)	Sel de potassium, metal de Ta
États-Unis	Cabot Corp.	Oxyde/métal de Nb et Ta, sel de potassium, FeNb, NiNb
		Poudre de condensateur de Ta
	H.C Starck Ink (N 5)	Métal de Nb et Ta, poudre de condensateur de Ta
	Kennametal, Inc.	Carbure de Nb et Ta
	Reading Alloys, Inc.	FeNb, NiNb
	Shieldalloy Metallurgical Corp. (N 2)	FeNb, NiNb
	Wah Chang (N 6)	Oxyde/métal de Nb, FeNb, NiNb
	H.C Starck TTI, Inc (N 4)	Poudre de condensateur de Ta
Note : (N 1) Nb, niobium. Ta, tantale; FeNb, ferroniobium; NiNb, nickel niobium; K-salt potassium; fluotantale; oxide, pentoxyde. (N 2) Filiale en propriété exclusive de Metallurg Inc, New York (N 3) Joint venture entre Showa Denko et Cabot Corp. (N 4) Filiale de H.C Starck GmbH & Co. KG. (N 5) Filiale commune de Bayer USA et H.C Starck GmbH & Co, KG (N 6) Filiale de Allegheny Teledyne Inc		

Tableau 1.22: Principaux producteurs mondiaux de niobium et de tantale [tm 172, L.D. Cunningham USGS 1997]

1.8.5 Problèmes environnementaux

Le principal impact environnemental lors de la production des métaux réfractaires est les poussières contenant des métaux et la poudre de métal dur ainsi que les fumées provenant des procédés de fusion par exemple lors de la production du chrome. Les émissions de poussières proviennent des opérations de stockage, manutention des matières premières et des produits et fonctionnement du four, où à la fois les émissions canalisées et les émissions fugitives jouent un rôle important.

L'utilisation d'hydrogène en tant qu'agent réducteur comporte un risque d'incendie. Le fluorure d'hydrogène qui est utilisé dans plusieurs procédés est très toxique et doit donc être manipulé avec précaution afin d'éviter au personnel de l'usine d'avoir des problèmes de santé. Un autre impact environnemental de la production de métaux durs est le niveau élevé de radioactivité de certaines matières premières (par exemple le pyrochlore) et la toxicité des composés métalliques tels que le cobalt et le nickel.

Les résidus et les sous-produits de procédé sont le laitier, la boue contenant des métaux, les poussières sous filtre et les réfractaires usagés. Ces matériaux sont déjà recyclés et réutilisés dans une large mesure lorsque cela est possible. En raison des niveaux de radioactivité de plusieurs matières premières, les résidus de ces procédés métalliques peuvent être radioactifs.

Le refroidissement, la granulation et d'autres effluents liés au procédé et au site sont responsables des émissions dans l'eau. Les eaux usées qui sont générées par les systèmes de dépollution par voie humide représentent un problème important.

Les émissions dans l'air, l'eau et le sol et par conséquent l'impact environnemental sont relativement faibles par rapport à d'autres secteurs de l'industrie des métaux non-ferreux. Ceci est dû aux petites quantités de métaux réfractaires produites et à la valeur élevée de ces métaux. Il en résulte qu'il est primordial de collecter, de filtrer et de recycler autant que possible ces métaux d'un point de vue économique. Le traitement de petits volumes d'effluents gazeux est également moins difficile parce qu'il peut être avantageux d'utiliser par exemple des filtres à manches à haute performance.

1.9 Ferroalliages

1.9.1 Général

Les ferroalliages sont des alliages contenant du fer et un ou plusieurs métaux non-ferreux en tant qu'éléments d'alliage. Les ferroalliages permettent aux éléments d'alliage tels que le chrome, le silicium, le manganèse, le vanadium, le molybdène, etc. d'être introduits de manière sûre et économique dans les procédés métallurgiques, transmettant ainsi certaines propriétés souhaitables au métal allié, par exemple pour augmenter la résistance à la corrosion, la dureté et la résistance à l'usure.

Leur importance s'est accrue avec le développement de la métallurgie de l'acier, qui a impliqué des éléments d'alliage plus diversifiés dans des quantités plus contrôlées, dans l'acier plus pur. L'industrie des ferroalliages est devenue un fournisseur clé pour l'industrie de l'acier.

Les ferroalliages sont habituellement classés en deux groupes :

- Les ferroalliages massifs (ferrochrome, ferrosilicium conjointement au silicium-métal, ferromanganèse et silicomanganèse), qui sont produits en grande quantité dans des fours à arc électrique ;
- Les ferroalliages spéciaux (ferrotitane, ferrovanadium, ferrotungstène, ferroniobium, ferromolybdène, ferrobore et alliages ternaire/quaternaire) qui sont produits en plus petite quantité, mais avec une importance croissante.

Les ferroalliages massifs sont utilisés exclusivement lors de la production de l'acier et dans les fonderies d'acier ou de fer. Les utilisations des ferroalliages spéciaux sont nettement plus variées, et la proportion utilisée lors de la production de l'acier a diminué ces dernières années en faveur de celles utilisés dans les industries de l'aluminium et les industries chimiques, en particulier les produits en silicium. Les figures suivantes représentent l'utilisation des ferroalliages, des ferroalliages massifs et spéciaux, répartis par secteur pour 1994.

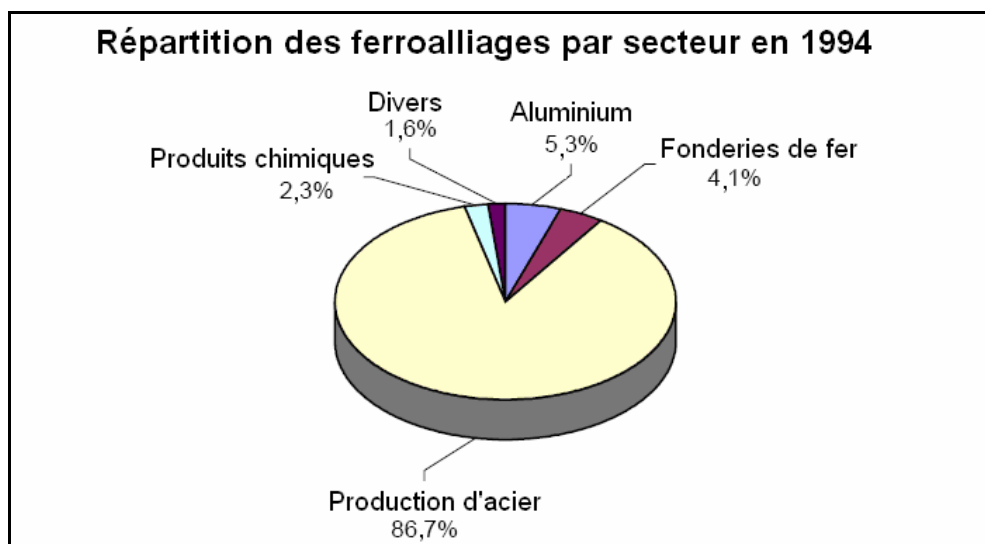


Figure 1.9 Utilisation des ferroalliages dans différents secteurs industriels en 1994

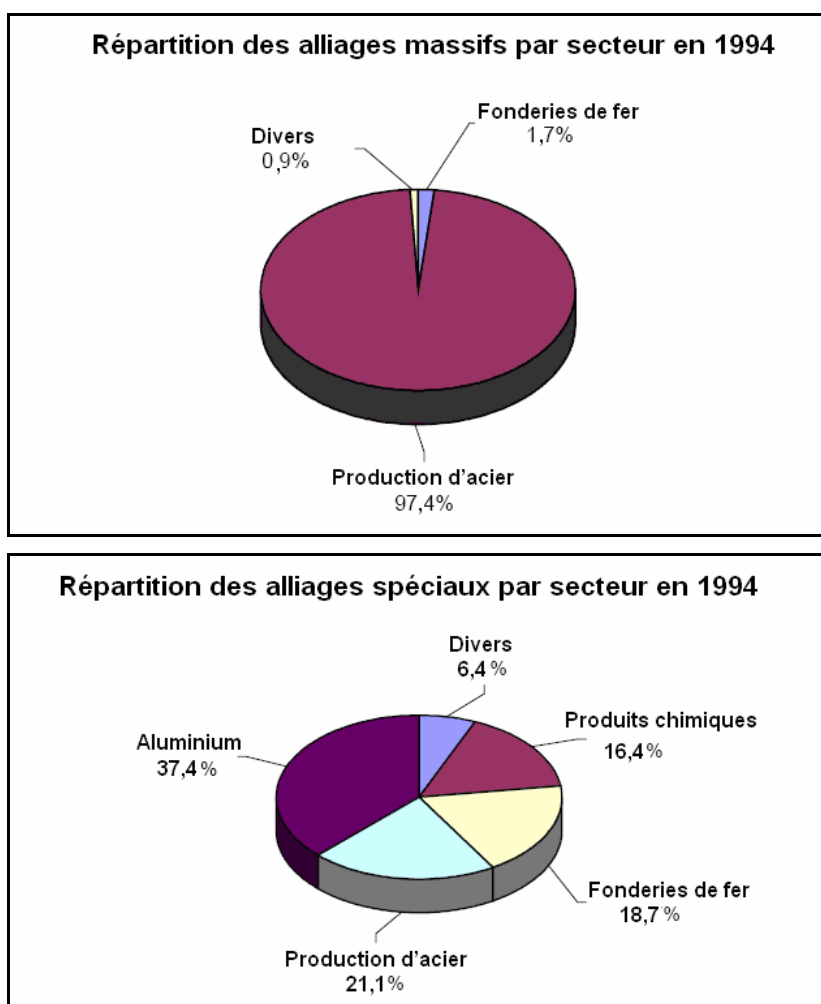


Figure 1.10 : Utilisation des ferroalliages massifs et spéciaux dans différents secteurs industriels en 1994
[tm 36, Panorama 1997]

1.9.2 Sources des matériaux

Les matières premières (éléments d'alliage) pour la production des ferroalliages sont soit extraites des mines pour elles-mêmes (quartzite pour le silicium, chromite pour le chrome...) soit des sous-produits provenant d'une autre production (par exemple, molybdénite provenant de l'extraction du cuivre). Bien entendu, les deux sources peuvent exister simultanément.

Elles peuvent également être récupérées des déchets, ce qui est le plus souvent le cas de par la quantité de fer dans leur composition, qui proviennent des déchets de fer et d'acier, mais également de par la présence de l'élément d'alliage lui-même, le titane par exemple. Les résidus provenant des aciéries comme les fours à arc électrique et les poussières sous filtre de convertisseur, ainsi que les poussières de grenaillage et de meulage, sont une matière première secondaire importante revêtant un intérêt croissant. Les sources des matières premières et les gisements de minéraux principaux pour les éléments d'alliage sont :

- La chromite qui est concentrée dans deux grands gisements, qui sont principalement situés en Afrique du Sud et au Kazakhstan. On trouve de plus petits gisements dans d'autres régions du monde, et en particulier en Europe (Finlande, Turquie, Albanie, Grèce) ;
- La matière première pour produire le ferrosilicium et le métal silicium est présente dans le monde entier, bien que toutes les sources ne permettent pas la production, dans des conditions

satisfaisantes sur les plans économique et de la qualité des produits de toutes les gammes d'alliages de silicium ;

- On trouve principalement le minerai contenant le manganèse en Afrique du Sud, en Ukraine, au Gabon et en Australie. De petits gisements se trouvent au Brésil, en Inde, au Mexique et en Birmanie. La qualité (teneur de manganèse et niveau/nature des impuretés) du minerai peut considérablement influencer l'économie de la production du ferroalliage ;
- Les éléments d'alliage spéciaux sont très souvent concentrés dans quelques pays (le molybdène en Amérique du Nord, au Chili et en Chine ; le niobium au Brésil) et les prix et les disponibilités sont très sensibles aux conditions économiques.

1.9.3 Production et consommation

Durant ces 15 à 20 dernières années, le modèle mondial du marché des ferroalliages a subi un profond changement :

- La consommation des pays en développement a considérablement augmenté avec le développement de leur production d'acier ;
- Leur production a même davantage augmenté parce qu'ils ont pris une part croissante des marchés traditionnels des pays industrialisés, où la production d'acier stagnait ou augmentait à un rythme lent.
- L'industrie des ferroalliages se trouve confrontée à une proportion croissante des importations, tout d'abord de la part des nouveaux pays industrialisés et ces dernières années de la part des pays de l'Europe de l'Est et de la CEI.

Par conséquent, la production européenne de ferroalliages a été soumise à une concurrence difficile qui se traduit par une tendance décroissante de la production totale de ferroalliages. Bien que les dernières années laissent apparaître une certaine stabilisation, et même une légère augmentation de la production, l'industrie européenne reste encore très sensible. Le véritable taux de production des ferroalliages massifs dans l'Union européenne exprimé en tonnes par an est représenté par le graphique ci-dessous et par le tableau sur la page suivante. Les informations concernant les chiffres de production proviennent de [tm 180, M. Tenton USGS 1997] et ont été communiquées par le groupe d'experts des ferroalliages.

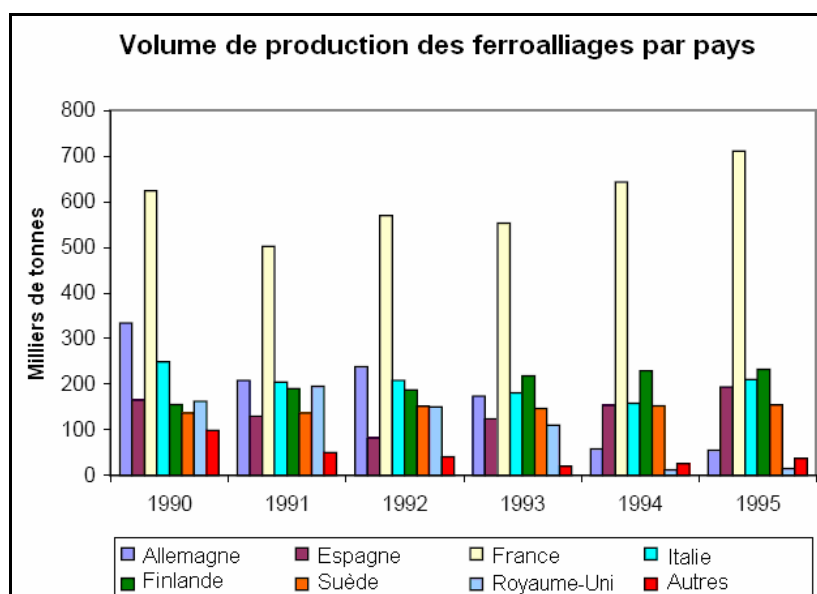


Figure 1.11 : Production de ferroalliages massifs en Europe [tm 36, Panorama 1997]

Le tableau suivant donne la production européenne totale de ferroalliages massifs partagée entre les différents alliages et les fours dans lesquels ils sont produits. Les chiffres présentés peuvent ne pas donner les capacités de production exactes et doivent être davantage considérés à titre d'indication.

Production	1993	1994	1995	1996	1997
Autriche : four électrique:					
Ferronickel 1/	8 000	5 250	6 200	5 000	5 000
Autres e/	5 900	5 900	5 900	5 900	5 900
Total	13 900	11 150	12 100	10 900	10 900
Belgique : four électrique, ferromanganèse e/	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000
Finlande : four électrique, ferrochrome	218 370	229 000	232 300	236 100r/	236 652 6/
France :					
Haut fourneau, ferromanganèse	300 000	294 000	384 000 r/	337 000 r/	326 000
Four électrique					
Ferromanganèse	57 000	66 200	46 000 r/	65 000 r/	60 000
Ferrosilicium	84 000	111 000	108 000	130 000r/e/	130 000
Silico-manganèse e/ 2/	80 000	66 000 r/	71 000 r/	61 000 r/	66 000
Métal silicium	59 000	66 000	71 450 r/	73 800 r/	74 000
Autres e/	29 000	20 000	20 000	20 000	20 000
Total e/	609 000	623 000 r/	664 000 r/	687 000 r/	676 000
Allemagne : e/					
Haut fourneau, ferromanganèse 3/	100 000	-	-	-	-
Four électrique					
Ferrochrome	16 400 6/	17 283 6/	21 665 r/ 6/	25 303 r/6/	25 856 6/
Ferromanganèse 4/	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
Ferrosilicium	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
Métal silicium	500	500	500	500	500
Autre 5/	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
Total	187 000	87 800	92 200 r/	95 800 r/	96 400
Grèce					
Ferronickel	10 930	16 190	17 170	17 800	17 610
Islande : four électrique, ferrosilicium	67 375	66 003	71 410	70 520 r/	71 000
Italie : four électrique : e/					
Ferrochrome	53 504 6/	22 650 6/	51 017 6/	29 915 6/	11 295 6/
Ferromanganèse	17 000	16 000	20 216 r/6/	25 143 r/6/	16 000
Silico- manganèse	50 000	40 000	103 961 r/6/	100 353 r/6	100 000
Métal silicium	10 000	-	10 000 r/	14 000 r/	15 000
Autres 6/	12 000	12 000	12 000	10 000	10 000
Total	143 000	90 700	197 000 r/	179 000 r/	152 000
Norvège : four électrique					
Ferrochrome	80 000	120 000	148 000 r/	108 900 r/	145 124 6/
Ferromanganèse	226 018	248 648	213 000 r/	215 000 r/	215 000
Ferrosilicium	399 559	452 984	474 875 r/	462 423 r/	470 000
Silico- manganèse	218 566	197 328	210 000 r/e/	210 000r/e/	210 000
Métal silicium	81 000	92 000	101 000	110 000 e/	110 000
Autres e/ 2/	14 000	14 000	15 000	15 000	15 000
Total e/	1 020 000	1 120 000	1 160 000 r/	1 120 000	1 170 000
Espagne : four électrique e/					
Ferrochrome	2 390 6/	2 300 6/	1 320 6/	805 6/	490 6/
Ferromanganèse	40 000	35 000	25 000	30 000 r/	35 000
Ferrosilicium	30 000	25 000	30 000	30 000	30 000
Silicomanganèse	35 000	35 000	50 000	70 000 r/	100 000
Métal silicium	5 000	3 000	5 000	5 000	15 000
Autres e/ 10/	5 000	4 000	5 000	5 000	5 000
Total e/	117 000	104 000	116 000	141 000 r/	185 000
Suède : four électrique					
Ferrochrome	127 543	134 076	130 170	138 110	101 842 6/
Ferrosilicium	20 381	21 392	21 970	21 287 r/	22 000
Total	147 924	155 468	152 140	159 397 r/	124 000
Suisse : four électrique					
Ferrosilicium	3 000	-	-	-	-
Métal silicium	2 000	-	-	-	-
Total	5 000	-	-	-	-
Royaume-Uni					
Haut fourneau, ferromanganèse	45 000	-	-	-	-
Four électrique autres e/	10 000	-	-	-	-
Total e/	55 000				
Note : e/ estimé ; r/ révisé ; 1/ chiffre déclarée ; 2/ y compris silicospiegel, s'il y en a ; 3/ y compris spiegel, s'il y en a ; 4/ y compris silicomanganèse, s'il y en a ; 5/ y compris ferrochrome silicium et ferronickel s'il y en a ; 6/ série sans calcium silicium.					

Tableau 1.23: Production européenne de ferroalliages massifs en tonnes par an

[tm 180, M. Tenton USGS 1997]

Le tableau suivant donne la capacité de production mondiale totale des ferroalliages massifs partagée entre les différents alliages et les fours dans lesquels ils sont produits. Les chiffres présentés peuvent ne pas donner les capacités de production exactes et doivent être davantage considérés à titre d'indication.

Type de four, 1/2/ et type d'alliage 3/	1993	1994	1995	1996	1997 e/
Total global :	15 700 000 t/	16 300 000 t/	17 700 000 t/	17 900 000 t/	17 600 000
Dont :					
Haut fourneau :					
Ferromanganèse 4/	1 210 000	1 010 000	874 000 t/	927 000 t/	871 000
Spiegel 5/	12 000	10 000	9 500	9 500	9 500
Autre 28/	225 000	230 000	230 000	220 000	220 000
Total haut fourneau	1 450 000	1 250 000	1 110 000t/	1 160 000 t/	1 100 000
Four à arc électrique :					
Ferrochrome 6/	3 270 000 t/	3 530 000 t/	4 550 000t/	4 010 000t/	4 470 000
Ferrochrome silicium	62 500	89 500	90 700	52 200	50 000
Ferromanganèse 7/8/	2 320 000	2 770 000 t/	2 780 000 t/	3 050 000 t/	2 900 000
Ferronickel	755 000 t/	772 000 t/	964 000 t/	923 000 t/	913 000
Ferrosilicium	4 010 000 t/	3 830 000 t/	4 070 000 t/	4 370 000 t/	4 130 000
Silicomanganèse 8/9	2 740 000 t/	2 850 000 t/	3 010 000 t/	3 110 000 t/	3 000 000
Métal silicium	564 000	559 000	588 000 t/	649 000 t/	662 000
Autre 10/	575 000 t/	635 000 t/	589 000 t/	589 000 t/	383 000
Total four électrique	14 300 000	15 000 000	16 600 000	16 700 000t/	16 500 000

Note : (tonnes, poids brut), e/ estimé, t/ révisé

1/ La production de ferroalliages de manganèse, ferrosilicium et métal silicium a commencé en 1996 pour l'Arabie Saoudite, mais les données pour la production réelle n'étaient pas disponibles.

2/ Dans la mesure du possible, la production de ferroalliages de chaque pays a été séparée selon le type de four d'où est issue la production ; la production provenant d'opération métallothermique est comprise avec la production des fours électriques.

3/ Dans la mesure du possible, la production de ferroalliages de chaque pays a été séparée pour laisser apparaître les types principaux de ferroalliages suivants : ferrochrome, ferrochrome silicium, ferronickel, ferrosilicium, silicomanganèse, métal silicium et spiegel. Les ferroalliages différents de ceux listés ci-dessus qui ont été identifiés spécifiquement à la source, ainsi que ces ferroalliages non identifiés spécifiquement, mais qui excluent définitivement ceux listés précédemment dans cette note, ont été reporté dans la rubrique « autres ». Lorsqu'un ou plusieurs des ferroalliages individuels listés séparément dans cette note ne peuvent pas être séparés des autres ferroalliages en raison d'un système de report du pays, les différences sont indiquées par des notes individuelles.

4/ Le spiegel, s'il y en a, pour l'Allemagne, est inclus avec les ferromanganèses des hauts fourneaux.

5/ Comprend les ferrophosphores et les données contenues dans « haut fourneau : autres ».

6/ Le ferrochrome comprend le ferrochrome silicium, s'il y en a pour le Japon, l'Afrique du Sud et les États-Unis.

7/ Le ferromanganèse comprend le silicomanganèse s'il y en a pour les pays portant la note 12 sur la ligne « ferromanganèse. 3 I/US production dans la rubrique « autres ».

8/ Y compris le silicospiegel s'il y en a pour la France.

9/ Y compris le calcium – silicium, le ferromolybdène, le ferrovanadium et les données contenues dans « four électrique »

10/ Autres pour chaque pays indiqué.

Tableau 1.24: Production mondiale de ferroalliages massifs [tm 180, M. Tenton USGS 1997]

En raison des développements et des changements techniques et métallurgiques dans le domaine de la production du fer et de l'acier, le modèle de consommation des ferroalliages a changé, en particulier dans les pays industrialisés :

- Une production stagnante d'acier au carbone qui est de plus en plus produite dans les fours à arc électrique à partir de déchets, qui permet de récupérer les éléments d'alliage, réduisant la consommation relative des ferroalliages ;
- Une production d'acier au carbone plus efficace (coulée continue, par exemple) et une métallurgie plus avancée conduisent à une chute significative de la consommation spécifique de manganèse (de 7 kg/tonne d'acier à 5 kg/tonne en vingt ans) et de ferrosilicium (de 5 kg/tonne d'acier à 3,5 kg/tonne en vingt ans) ;
- Un besoin croissant pour des éléments d'alliage sophistiqués du point de vue métallurgique (niobium, molybdène) et pour des éléments de traitement (calcium) a conduit à une consommation accrue des alliages spéciaux ;

- Une production croissante d'acier inoxydable a conduit à une augmentation significative de la consommation des alliages de chrome (principalement, le ferrochrome à haute teneur en carbone).

En prenant tout en compte, la consommation de l'Europe de l'Ouest a été plus ou moins stagnante, à environ 4 200 000 tonnes par an, et sa production est passée de 4 000 000 tonnes à 3 000 000 tonnes ces dix dernières années.

1.9.4 Sites de production

On trouve un certain nombre de sociétés productrices de différents ferroalliages dans environ 60 sites de production industrielle en Europe. Les plus grands pays européens producteurs de ferroalliages sont la Norvège pour la production des ferroalliages massifs et la France et l'Espagne en particulier pour la production des alliages de manganèse et de silicium. La Finlande est un producteur majeur de ferrochrome provenant d'une mine de minerai de chrome locale. En Suède, on produit principalement du ferrochrome et du ferrosilicium. Les ferroalliages spéciaux comme le ferromolybdène, le ferrovandium et le ferrotitane sont produits au Royaume-Uni, en Belgique, en Autriche et en Allemagne.

1.9.5 Problèmes environnementaux

La production des ferroalliages implique généralement l'utilisation des fours à arc électrique et des creusets de réaction dans lesquels on charge les produits naturels (par exemple, le quartz, la chaux, différents minerais, le bois, etc.) avec des compositions physiques relativement fluctuantes. Par rapport à cela, l'impact environnemental principal de la production des ferroalliages est l'émission de poussières et de fumées provenant des procédés de fusion. Les émissions de poussières proviennent aussi du stockage et de la manutention ainsi que du prétraitement des matières premières où les émissions de poussières fugitives jouent un rôle important. En fonction de la matière première et du procédé utilisé, les autres émissions dans l'air sont SO_2 , NO_x , le gaz CO , CO_2 , les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils et les métaux volatils. Des dioxines peuvent éventuellement se former dans la zone de combustion et dans la partie de refroidissement du système de traitement des effluents gazeux (synthèse de novo).

Les résidus et les sous-produits de procédé en quantité significative sont le laitier, les poussières sous filtre et les boues, et les réfractaires usagés. Lorsque cela est possible, ces matériaux sont déjà recyclés et réutilisés en grande partie. Le laitier riche, c'est-à-dire un laitier avec une proportion relativement importante d'oxydes métalliques, est utilisé en tant que matière première dans d'autres productions de ferroalliages. L'une des matières premières les plus importantes pour la production de silicomanganèse est par exemple, le laitier riche issu de la production du ferromanganèse.

Les émissions dans l'eau proviennent des procédés de refroidissement, granulation et d'autres procédés ainsi que des effluents liés au site. Les eaux usées générées par le système de dépollution par voie humide jouent également un rôle important.

L'industrie des ferroalliages, dont l'outil de base est un four à arc électrique dans lequel les oxydes métalliques sont réduits par du carbone, est une grande consommatrice d'énergie et un producteur de dioxyde de carbone (CO_2). Par conséquent, la réduction de la consommation d'énergie a toujours été considérée comme étant une priorité vitale. Les lois de la thermodynamique, qui gouvernent les réactions utilisées, limitent la réduction de l'énergie nécessaire pour le procédé de fusion. Dans la plupart des cas, la réduction de la consommation d'énergie globale n'est donc possible qu'en utilisant un système de récupération d'énergie efficace. L'énergie récupérée peut être transformée en énergie électrique ou utilisée en tant que chaleur pour différents buts. Les effluents gazeux riches en CO provenant des fours fermés peuvent également être utilisés en tant que combustibles ou matières premières secondaires pour des procédés chimiques. La récupération de l'énergie réduit l'utilisation des autres ressources d'énergie naturelles et par conséquent l'impact sur le réchauffement climatique.

1.10 Métaux alcalins et métaux alcalino-terreux

1.10.1 Général

Les métaux alcalins, qui appartiennent chimiquement au premier groupe du tableau périodique des éléments, comprennent des métaux tels que le lithium, le sodium, le potassium ainsi que les substances radioactives extrêmement rares - francium. Les métaux alcalins sont caractérisés par leurs points de fusion bas et leur faible densité. Ils ont une couleur blanc argenté et sont plus tendres que les autres métaux. Les métaux alcalins ont un seul électron très mobile dans la couche électronique externe. À cet égard, les métaux alcalins sont très réactifs en particulier avec l'oxygène ou l'eau avec lesquels ils peuvent également réagir violemment en produisant de l'hydrogène gazeux et de la chaleur.

Les métaux alcalinoterreux ressemblent aux métaux alcalins à plusieurs égards mais ils réagissent moins vigoureusement avec l'eau. Les métaux alcalinoterreux sont des éléments qui appartiennent au second groupe du tableau périodique. Ce groupe est constitué du magnésium, du calcium et du strontium, dans l'ordre croissant de leurs nombres atomiques et de leur importance métallurgique et technique.

1.10.2 Sources des matériaux

Le sodium ainsi que les composés et le métal de sodium sont très utilisés dans l'industrie pour fabriquer des produits chimiques et des produits pharmaceutiques, dans les procédés métallurgiques et dans toute une variété d'autres produits quotidiens. Le métal sodium est communément produit par l'électrolyse du chlorure de sodium fondu.

Le métal lithium est produit d'une manière très similaire au métal sodium. La production a lieu par l'électrolyse d'un mélange eutectique en fusion de chlorure de lithium et de chlorure de potassium à environ 450°C dans une cellule Downs.

Le potassium, qui a été découvert en 1807 par le chimiste anglais Humphry Davy, est présent dans de nombreuses roches et minéraux de silicate, où la source principale commerciale est représentée par les gisements de sel. Le métal potassium a une couleur blanc argenté et a été le premier métal à être isolé par électrolyse. À l'échelle industrielle, le métal potassium sera uniquement produit par la réduction du chlorure de potassium avec le métal sodium.

Comme le potassium, Humphry Davy a découvert le magnésium en tant qu'élément métallique en 1808. Il s'agit d'un métal chimiquement actif, ductile, blanc argenté qui appartient au groupe des métaux alcalins. Le magnésium peut être produit par l'électrolyse du chlorure de magnésium basé sur une matière première telle que la dolomite et l'eau de mer, la magnésite, la carnallite ou les saumures ou issu de la dolomite qui peut être réduite avec du ferrosilicium et/ou de l'aluminium dans un procédé de réduction thermique. Le magnésium sera également récupéré et produit en tant que magnésium secondaire à partir d'une grande plage de résidus contenant du magnésium et de déchets de magnésium métalliques.

La majeure partie du magnésium est utilisée dans les alliages d'aluminium, alors que le taux de croissance le plus rapide est rencontré lors de l'utilisation des alliages de magnésium dans le moulage sous pression des pièces destinées à être utilisées chaque fois que le poids revêt une importance particulière, par exemple dans l'industrie automobile. Une autre grande plage d'applications est la désulfuration de l'acier en utilisant de la poudre de magnésium. L'utilisation croissante des résidus de magnésium secondaire pour la désulfuration de l'acier réduit la croissance de la production de la poudre de magnésium primaire. L'utilisation mondiale du métal magnésium dans les différents marchés est représentée ci-dessous [tm 1, HMIP 1993].

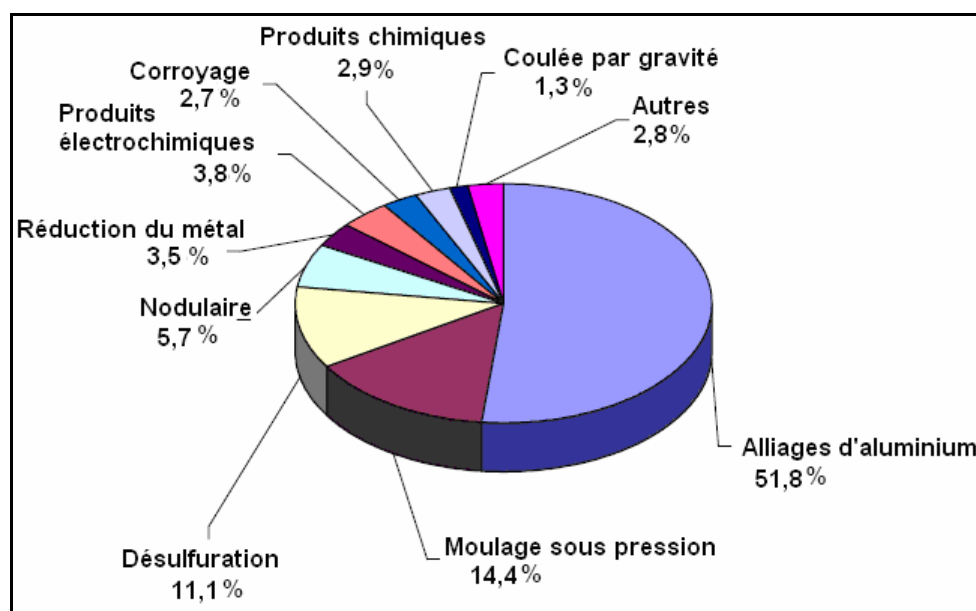


Figure 1.12 : Utilisation mondiale du métal magnésium

Les métaux calcium et strontium sont utilisés pour toute une variété de raisons. Le calcium en tant qu'élément d'alliage améliore la qualité des aciers, en particulier les propriétés mécaniques comme la capacité de formage, le retrait et l'usinabilité. En raison de sa forte capacité à former des oxydes et des sulfures, le calcium est important lors de la production de l'acier ultra-propre. Le métal calcium peut également être utilisé pour éliminer le bismuth du plomb. Le métal strontium est nécessaire dans l'affinage de l'aluminium ainsi que pour l'affinage du laitier d'acier.

1.10.3 Production et consommation

La production des métaux alcalins et alcalinoterreux, en particulier pour la production des métaux sodium, lithium, calcium et strontium, ne concerne que quelques sociétés. La capacité mondiale de la production de magnésium primaire est de l'ordre d'environ 400 000 tonnes par an dont la production européenne représente environ 57 000 tonnes par an. Les tableaux suivants donnent une vue d'ensemble en matière de capacité de production du magnésium primaire, et de productions mondiales de magnésium primaire et secondaire par pays [tm 189, D. Kramer, USGS, 1997].

Continent et pays	Capacité	Nombre de producteurs
Amérique du nord:		
Canada	49 000	2
États-Unis	80 000	2
Europe:		
France	17 000	1
Kazakhstan (N 3)	10 000	1
Norvège	35 000	1
Russie (N 3)	45 000	2
Serbie et Monténégro	5 000	1
Ukraine (N 3)	24 000	1
Autres:		
Chine	~ 150 000 – 200 000	~ 200
Inde	900	1
Brésil	10 000	1
Israël	27 500	1
Total mondial (N 1, 2)	503 400	~ 215
Note: N 1 Comprend la capacité dans les usines en exploitation, ainsi que dans les usines ayant une production discontinue N-2 Les données sont arrondies aux trois chiffres significatifs ; ne peuvent pas s'ajouter au total présenté. N 3 Sauf capacité de production du magnésium qui est utilisée exclusivement pour la production de titane		

Tableau 1.25: Production mondiale du magnésium primaire par pays

Pays	1993	1994	1995	1996	1997 e/
Production primaire:					
Brésil e/	9 700	9 700	9 700	9 000	9 000
Canada e/	23 000	28 900	48 100	54 000	57 700
Chine e/	11 800	24 000	93 600	73 100 r/	92 000
France	10 982	12 280	14 450	14 000 e/	12 000
Israël	-	--	-	-	8 000
Japon	7 471	3 412	-	--	--3/
Kazakhstan e/	2 000	- 3/	9 000 r/	9 000 r/	8 972 3/
Norvège	27 300	27 635	28 000 e/	28 000 r/ e/	28 000
Russie e/ 4/	30 000	35 400	37 500	35 000	39 500
Serbie et Monténégro	- e/	-	2 560	2 500 e/	2 500
Ukraine e/	14 900	12 000	10 000 r/	10 000 r/	10 000
États-Unis	132 000	128 000	142 000	133 000	125 000 3/
Total	269 000	282 000	395 000 r/	368 000 r/	392 000
Production secondaire					
Brésil e/	1 600	1 600	1 600	1 600	1 600
Japon	13 215	19 009	11 767	21 243 r/	22 797 3/
URSS e/ 5/	6 000	5 000	6 000	6 000	n.d
Royaume-Uni e/ 6/	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
États-Unis	58 900	62 100	65 100	70 200 r/	80 200 3/
Total	80 700	88 700	85 500	100 000 r/	106 000
Note : 1/ Les totaux mondiaux et les données estimées sont arrondis aux trois chiffres significatifs ; ne peuvent pas s'ajouter aux totaux présentés. 2/ Le tableau comprend les données communiquées le 22 juillet 1998 3/ chiffres déclarés 4/ y comprend secondaire 5/ Dissoute en décembre 1991 ; cependant les informations sont inadéquates pour communiquer des estimations fiables pour les pays individuels de l'ancienne URSS 6/ Comprend des alliages r/ Révisé e/ Estimé					

Tableau 1.26: Quantités de magnésium primaire et secondaire produites en tonnes par an

1.10.4 Sites de production

Il n'y a que quelques sites de production de sodium, lithium et potassium dans l'Union européenne. Le métal sodium est produit par Octel Associated, une société située au Royaume-Uni, et une société qui dirige une production de sodium en France. Pour la production du magnésium primaire, il existe deux sociétés en Europe. Hydro magnesium (NHM) exploite une usine de magnésium électrolytique à Porsgrunn, Norvège, avec la dolomite et l'eau de mer en tant que matières premières. Pechiney Electrometallurgie (PEM) exploite une usine de réduction thermique à Marignac en France, basée sur le procédé Magnétherme qui est un procédé développé par Pechiney. Il existe surtout de petites sociétés produisant du magnésium secondaire dans l'UE. Dans l'UE, une seule installation produit du métal calcium, une seule autre du strontium. Les deux installations sont dirigées par Pechiney Electrometallurgie (PEM) dans son usine située à La Roche de Rame en France.

1.10.5 Problèmes environnementaux

Les principaux problèmes environnementaux lors de la production des alcalins et alcalinoterreux sont les émissions dans l'air et dans l'eau. La génération des émissions dans l'air est due à la nature poussiéreuse de certains procédés et des opérations unitaires qui sont utilisés lors de la production des alcalins et alcalinoterreux. Par exemple, le déchargement, le broyage et la calcination des matières premières sont concernés par la génération de poussières. Un autre problème environnemental principal est l'émission de chlore et de composés à base de chlore comme les hydrocarbures chlorés et les dioxines. Les hydrocarbures chlorés et les dioxines sont principalement émis lors du procédé de chloration qui est utilisé lors de l'électrolyse du magnésium. Ces polluants doivent être éliminés des effluents gazeux, ce qui peut être réalisé en utilisant un système de traitement par voie humide. Ceci se traduit par conséquent par la génération d'une eau de lavage polluée qui a elle-même besoin d'un traitement des eaux usées efficace. Les émissions dans l'eau sont également produites en lavant le gâteau de filtration provenant du procédé de production de sodium. Pour empêcher la réoxydation du métal magnésium par l'air ambiant, on utilise l'hexafluorure de soufre (SF_6) dans les équipements de coulée, où il est également émis dans l'atmosphère.

1.11 Nickel et cobalt

1.11.1 Nickel

1.11.1.1 Général

Le nickel [tm 36, panorama 1997 ; tm 94, groupe d'experts sur le nickel 1998] est un métal blanc argenté avec des propriétés métalliques typiques. Bien qu'il n'ait été découvert en tant que métal qu'en 1751, ses alliages ont été utilisés pendant plusieurs siècles, par exemple la Chine fabriquait le « cuivre blanc » qui avait l'apparence de l'argent. Entre 1870 et 1880, l'utilisation du nickel dans les aciers d'alliage a été démontrée, et le plaquage électrolytique du nickel s'est développé avec succès.

La plus grande importance du nickel se retrouve dans sa capacité, lorsqu'il est allié à d'autres éléments, à augmenter la solidité, la dureté et la résistance à la corrosion d'un métal sur une large plage de températures. Le nickel est par conséquent un élément commercial extrêmement important. Etant donné ces propriétés spécifiques, le nickel est utilisé dans une grande variété de produits. La plupart du nickel primaire est utilisée dans des alliages, dont le plus important est l'acier inoxydable. D'autres utilisations comprennent le plaquage électrolytique, les fonderies, les catalyseurs, les batteries, la frappe des monnaies et d'autres applications diverses. Le nickel est présent dans les produits de transport, l'équipement électronique, les produits chimiques, les matériaux de construction, les produits du pétrole, l'équipement aérospatial, les biens de consommation durables, les peintures et les céramiques. Le nickel est un métal vital pour les sociétés industrialisées.

Chimiquement, le nickel ressemble au fer et au cobalt, ainsi qu'au cuivre. Le nickel peut former plusieurs composés, par exemple du sulfate, du chlorure, de l'oxyde et de l'hydroxyde. Une propriété du nickel est sa capacité à réagir directement avec le monoxyde de carbone pour former un complexe de carbone binaire qui est volatil aux températures ambiantes. A des températures modérées, le nickel est résistant à la corrosion venant de l'air, de l'eau de mer et des acides non oxydants. Une autre propriété du nickel est sa résistance à la corrosion par rapport aux alcalis. A l'opposé, le nickel est attaqué par des solutions aqueuses d'ammoniac.

1.11.1.2 Sources des matériaux

Le nickel est un élément naturel qui existe dans la nature principalement sous la forme de sulfure, oxyde et minerai de silicate. Les gisements sont de deux types principaux :

- On rencontre souvent les sulfures de nickel conjointement à des quantités économiquement récupérables de cuivre, de cobalt, d'or, d'argent, des métaux du groupe du platine et d'autres différents métaux. Les gisements les plus importants se trouvent en Afrique, en Australie, au Canada et en Sibérie.
- Les latérites de nickel sont les produits de l'érosion des roches ultrabasiques qui contenaient à l'origine de très petites quantités de nickel. Avec le temps, les impuretés sont éliminées des gisements et le nickel est présent en tant qu'oxyde complexe de silicium, fer et magnésium. Le cobalt et le fer sont communément associés au nickel, mais les latérites ne contiennent pas d'autres constituants de valeur. Les gisements les plus importants se trouvent dans les régions tropicales en Asie du Sud-Est, Australie, Amérique du Sud, dans les Caraïbes et dans la zone des Balkans, en particulier la Grèce, qui est la seule source de minerai de nickel en Europe au moment de la rédaction du présent document.

La métallurgie complexe du nickel explique la large plage de procédés d'extraction et d'affinage en fonctionnement. Chaque installation présente un ensemble unique de caractéristiques de procédé et de problèmes environnementaux. La teneur en nickel des minerais sulfurés peut habituellement être concentrée plusieurs fois par des techniques de transformation de minerai relativement économiques avant que le concentré ne soit fondu et affiné en produits en nickel.

Au contraire, les minerais de latérite ne sont sensibles qu'à un enrichissement limité par des procédés physiques, par exemple des techniques magnétiques ou de milieu lourd et par conséquent presque tout le volume du minerai doit aller directement aux installations métallurgiques. Ainsi, le traitement de la latérite a tendance à être plus coûteux, mais les coûts d'extraction minière sont habituellement nettement plus bas que pour les minerais soufrés.

Ces différences, en plus de la disponibilité de sous-produits de valeur, peuvent avoir une influence importante sur la viabilité d'un gisement spécifique et si la production du métal affiné ou de ferronickel est envisageable à partir de ce gisement.

1.11.1.3 Production et consommation

Les produits de nickel peuvent être divisés en trois groupes basés sur la classification de l'industrie qui est reconnue internationalement :

Classe I – nickel affiné, 99 % ou plus de teneur en nickel. Le groupe comprend le nickel électrolytique, les pastilles, les briquettes, les granulés, les rondelles et poudres/flocons.

Classe II – nickel de charge, moins de 99 % de teneur en nickel. Le groupe comprend le ferronickel, l'aggloméré d'oxyde de nickel et le nickel commercial.

Classe III – produits chimiques - oxydes, sulfates, chlorures, carbonates, acétates et hydroxydes de nickel, etc.

La production mondiale du nickel est restée au-dessous de 1 000 tonnes par an jusqu'à 1876 ; actuellement, elle avoisine les 1 000 000 tonnes par an. La production de nickel primaire dans le monde en 1996 était d'approximativement 950 000 tonnes et la capacité de production avoisinait 1 200 000 tonnes. En Europe, la capacité de production est d'approximativement 200 000 tonnes et la consommation est d'approximativement 330 000 tonnes, par conséquent le nickel est importé.

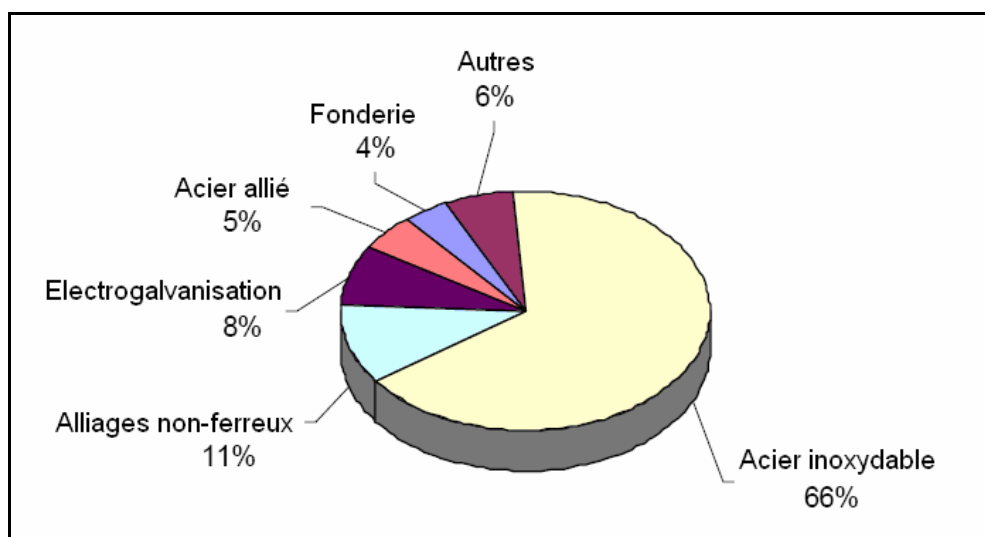


Figure 1.13: Utilisation de Ni dans les pays occidentaux en 1996

La consommation du nickel dans le monde occidental a augmenté en moyenne de 6,5 % par an de 1945 à 1974. La consommation a sévèrement chuté en 1975 et la demande de nickel est restée stable pendant les dix années suivantes. La consommation du nickel dans le monde occidental a augmenté respectivement en 1987. La nouvelle reprise de la demande de nickel a commencé en 1993 en augmentant d'environ 15 % en 1995, et continue aujourd'hui. La consommation de nickel dans le monde en 1996 était d'approximativement 940 000 tonnes et on s'attend à ce que la demande reste forte.

1.11.1.4 Sites de production

Le nickel est produit en Europe dans les sites suivants.

Producteur	Source de matière première	Capacité de production tonnes/an de Ni	Sous-produits
Outokumpu, Finlande	Finlande, Norvège et Australie	36 000	Cu, Co, acide sulfurique
Eramet, France	Nouvelle Calédonie	16 000	Chlorure de cobalt, chlorure ferrique
Falconbridge, Norvège	Canada & Botswana	85 000	Cu, Co, acide sulfurique
INCO, Royaume-Uni	Canada	41 000 (poudre et granules de Ni)	Sulfate de nickel
Treibacher, Autriche	Secondaire	4 000	Production de FeNi
Larco, Grèce	Grèce	20 000	Production de FeNi
Total		202 000	

Tableau 1.27: Sites de production de nickel

La production réelle totale provenant des sites ci-dessus était de 167 900 tonnes en 1996 par rapport à 144 800 tonnes en 1994.

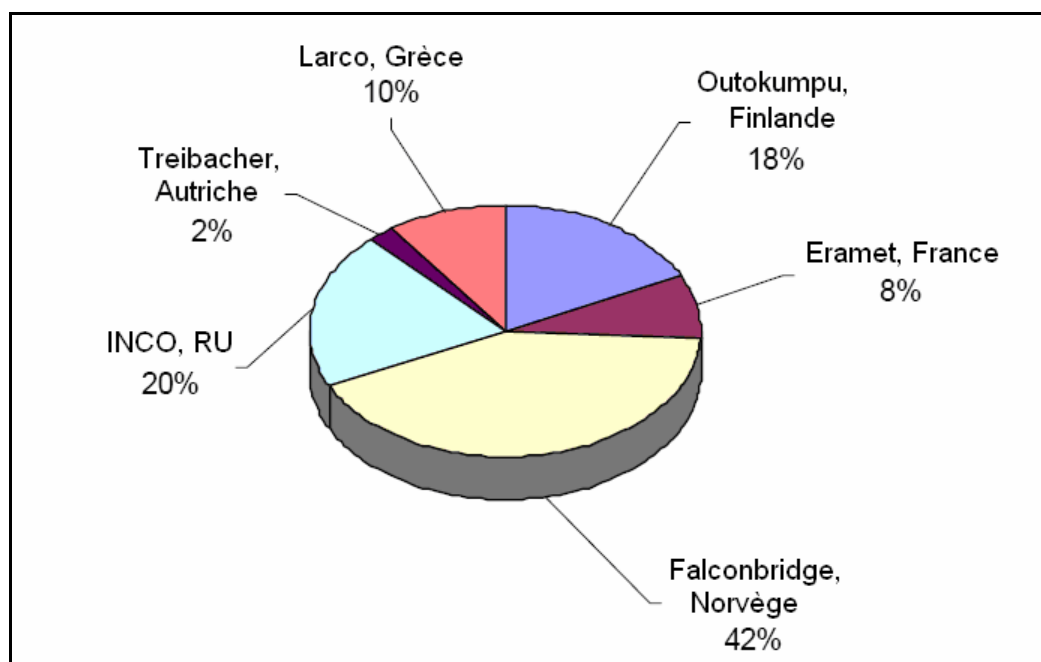


Figure 1.14: Production de nickel en Europe

1.11.1.5 Problèmes environnementaux

L'émission de dioxyde de soufre dans l'air provenant du grillage et de la fusion des concentrés de soufre est un problème environnemental potentiellement grave. Ce problème a été efficacement résolu par les fonderies européennes qui obtiennent maintenant en moyenne 98,9 % de fixation du soufre et produisent de l'acide sulfurique et du dioxyde de soufre liquide. Les émissions fugitives de poussières, de métaux et de solvants qui représentent également un problème, doivent être empêchées et contrôlées. L'utilisation de chlore dans certains procédés est couplée à des mesures et alarmes anti-fuite importantes.

Les principaux problèmes environnementaux associés à la production du nickel secondaire sont également liés aux effluents gazeux provenant des différents fours en fonctionnement. Ces gaz sont épurés dans des filtres à manches qui peuvent ainsi réduire les émissions de poussières et de composés métalliques tels que le plomb. Des dioxines peuvent éventuellement se former en raison de la présence de petites quantités de chlore dans les matières premières secondaires, et leur destruction doit être envisagée.

Le statut de certains composés de nickel a un impact significatif sur l'évaluation des émissions, et le nickel est listé dans la directive 76/464, directive relative aux substances dangereuses pour l'eau - dans la liste II. Un groupe de travail technique, mandaté dans le cadre de la directive 96/62/EC relative à la Gestion et l'évaluation de la qualité de l'air, développe une norme de la qualité de l'air ambiant pour le nickel. D'autre part, le nickel se trouve être un élément essentiel pour certains micro-organismes, animaux et plantes.

Le nickel est un produit durable. L'acier inoxydable et d'autres alliages contenant du nickel sont les sources principales de nickel secondaire. On estime qu'environ 80 % du nickel proviennent du recyclage des déchets d'acier inoxydable nouveaux et anciens et reviennent à cette utilisation finale. D'autres matériaux porteurs de nickel tels que les précipités et les résidus sont recyclés pour être réintroduits dans la production primaire.

Dans de nombreuses applications, les alliages de nickel sont essentiels et ne peuvent pas être remplacés par d'autres matériaux. L'utilisation du nickel dans des applications dans lesquelles ses propriétés de résistance mécanique, de résistance à la corrosion, de conductivité élevée, de caractéristiques magnétiques et de propriétés catalytiques sont exploitées, est considérée comme étant un bénéfice environnemental positif. De même, l'utilisation du nickel dans les piles rechargeables représente également un bénéfice environnemental.

1.11.2 Cobalt

1.11.2.1 Général

Le cobalt [tm 36, panorama 1997 ; tm 94, groupe d'experts sur le nickel 1998] est un métal blanc argenté avec des propriétés métalliques typiques, qui a été isolé pour la première fois en 1735. Le cobalt métallique pur a quelques applications, mais son utilisation en tant qu'élément d'alliage pour des applications résistantes à la chaleur ou à l'usure, et en tant que source de produits chimiques, fait de lui un métal stratégiquement important.

Bien que le métal cobalt ait été très peu utilisé jusqu'au XXe siècle, ses minerais ont été utilisés pendant des milliers d'années en tant qu'agents de coloration bleue pour le verre et la poterie, par exemple sur les poteries égyptiennes datées de 2600 avant Jésus Christ et sur les poteries chinoises d'environ 700 après JC par exemple. L'utilisation du cobalt en tant que métal date de 1907, lorsque E. Haynes a breveté toute une série d'alliages de cobalt - chrome désignés sous le nom de Stellites qui étaient les ancêtres des supers alliages modernes. En 1930, on a démontré sa capacité à améliorer les propriétés des aimants permanents.

Le cobalt est utilisé dans des alliages comprenant les supers alliages pour les moteurs d'avion, les alliages magnétiques pour les aimants permanents puissants, les alliages de métal dur pour les matériaux d'outil de coupe, les carbures cémentés, les alliages résistant à l'usure ou à la corrosion et les alliages déposés électrolytiquement pour donner des revêtements métalliques résistants à l'usure et à la corrosion. Son utilisation dans les piles rechargeables a été une application à croissance rapide ces dernières années.

Les produits chimiques au cobalt sont utilisés dans les piles rechargeables ; en tant que pigments dans les industries du verre, de la céramique et de la peinture ; en tant que catalyseurs dans l'industrie du pétrole ; en tant que siccatifs ; et en tant qu'additifs métalliques sous forme de traces pour l'utilisation agricole et médicale.

1.11.2.2 Sources des matériaux

Depuis le début du XXe siècle, la ressource principale mondiale de cobalt est passée de l'Europe à l'Afrique, l'Australie, la Russie et au Canada. Aujourd'hui, la production est d'environ 30 000 tonnes par an. Le cobalt est principalement produit comme un sous-produit de l'extraction minière et de la transformation des minerais de cuivre et de nickel. Les minerais d'argent, d'or, de plomb et de zinc peuvent également contenir des quantités considérables de cobalt, leur traitement ne conduit pas toujours à la récupération. Les sources de minerai sont :

- les gisements de cuivre cobalt au Congo et au Zambia
- les gisements de sulfures de nickel en Australie, au Canada, en Finlande et en Russie
- les gisements d'oxydes de nickel à Cuba, en Nouvelle Calédonie, en Australie et en Russie.

La récupération issue des sources secondaires peut avoir lieu par le biais de l'introduction des matériaux recyclés à une étape appropriée du procédé d'affinage ou de transformation primaire, en fonction de ses capacités techniques et économiques. Des étapes supplémentaires ou de prétraitement peuvent être nécessaires. Les produits finaux peuvent être des cathodes, des poudres, des oxydes, des sels ou des solutions.

1.11.2.3 Production et consommation

Le cobalt primaire se présente toujours associé à d'autres métaux, en particulier le cuivre et le nickel, et ceux-ci sont habituellement prédominants. En fonction des matières chargées, on a développé plusieurs procédés qui peuvent impliquer des étapes pyrométallurgiques ainsi qu'hydrométallurgiques. Ces étapes produisent soit :

- une solution riche en cobalt dans des unités intégrées
- un sulfure, hydroxyde ou carbonate riche en cobalt si le raffinage supplémentaire est réalisé ailleurs
- un alliage riche en cobalt.

Le raffinage supplémentaire est hydrométallurgique, bien que l'étape finale, la production d'un produit commercial, peut être un procédé à haute température ; en particulier, lorsque le produit est une poudre et que l'activité de raffinage est intégrée dans le procédé de transformation. La capacité de production mondiale est approximativement de 30 000 tonnes.

Le cobalt est utilisé pour toute une variété d'utilisations et celles-ci sont représentées dans le tableau suivant.

Utilisations	Répartition de la production totale de cobalt
Alliages	34%
Céramiques	12%
Métal dur	11%
Aimants	10%
Catalyse	8%
Outils de coupe	6%
Batteries	6%
Bandes magnétiques	4%
Autres	9%

Tableau 1.28: Répartition de la production totale de cobalt dans les différents secteurs d'utilisation

La demande concernant le cobalt dans le monde occidental est d'environ 25 000 tonnes par an, l'Europe représente approximativement 25 % de cette valeur. L'utilisation du cobalt dans les piles est un secteur en croissance et ceci nécessite du cobalt métal, de l'oxyde ou une poudre d'hydroxyde de cobalt, la morphologie de la poudre est un facteur important.

1.11.2.4 Sites de production

Le cobalt et les composés de cobalt sont principalement produits sur les mêmes sites qui produisent le nickel. Les sites sont représentés dans le tableau 1.27 (rubrique nickel). De plus, Union Minière en Belgique produit également du cobalt.

La production mondiale est représentée sur la figure suivante.

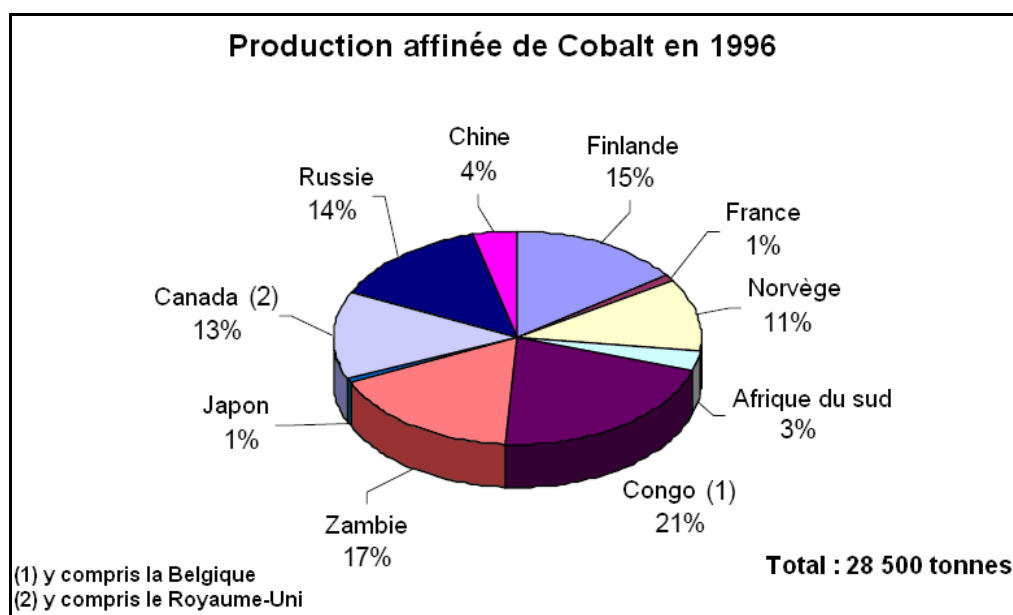


Figure 1.15 : Production mondiale de cobalt

1.11.2.5 Problèmes environnementaux

Le statut de certains composés de cobalt a un impact significatif sur l'évaluation des émissions et le cobalt est listé dans la directive 76/464, directive portant sur les substances dangereuses pour l'eau - liste II. Il y a des émissions potentielles de poussières et de métaux provenant des opérations de meulage, et dans une moindre mesure des opérations hydrométallurgiques ; le chlore dans l'extraction électrolytique et des composés organiques volatils dans l'extraction de solvant ; les métaux dans les effluents de la purification hydrométallurgique et des opérations de récupération ; des déchets solides issus de la purification et du traitement des effluents. L'industrie utilise toute une variété de techniques pour récupérer et produire le cobalt en fonction des matières premières et les mélanges de produits finaux essentiellement, et la véritable occurrence et la véritable importance de ces problèmes sont par conséquent spécifiques à un site donné.

L'utilisation du cobalt dans les piles rechargeables représente un bénéfice environnemental.

1.12 Carbone et graphite

1.12.1 Général

Il existe une large gamme de produits en carbone et graphite qui sont utilisés au moment de la rédaction du présent document. Ils vont des grandes électrodes jusqu'aux petites douilles et roulements. D'autres produits spécialisés tels que les fibres de carbone et les composites de carbone sont également fabriqués pour les industries à haute technologie qui ont besoin de la résistance très élevée et du faible poids de ces matériaux.

Le carbone existe sous trois formes, diamant, graphite et carbone amorphe. La différence entre les allotropes est essentiellement la structure des atomes de carbone et la structure détermine les propriétés du matériau résultant. Les produits en carbone et en graphite sont impliqués dans de multiples applications parce qu'ils sont conçus pour avoir une résistance, une dureté, des propriétés électriques et mécaniques spécifiques, et en particulier une très haute pureté et une résistance chimique élevée dans des conditions dépourvues d'oxygène, etc., pour satisfaire les exigences de certaines applications particulières [tm 207, TGI 1999].

Les matériaux en carbone et graphite sont principalement utilisés pour la conduction du courant électrique (cathodes et électrodes de graphite) et en tant qu'agents de réduction chimique dans l'industrie de l'aluminium (anodes).

Les produits en carbone et graphite sont fondamentalement divisés en quatre groupes de produits.

- | | |
|--------------------------------|--|
| • Green mix et pâte | Principalement utilisés dans l'aluminium, les ferroalliages et pour les hauts fourneaux dans l'industrie de l'acier. |
| • Anodes | Principalement utilisées dans l'industrie de l'aluminium en tant qu'agents chimiques de réduction. |
| • Carbone et graphite | Principalement utilisés pour le recyclage de l'acier dans les fours d'acier à arc électrique, et en tant qu'électrodes non consommées dans l'industrie de l'aluminium. |
| • Carbone et graphite spéciaux | Une grande plage de produits allant des produits à très haute pureté jusqu'aux produits avec une résistance mécanique et thermique très élevée. |

Les applications des spécialités de carbone sont approximativement divisées en :

- le carbone et le graphite haute pureté
- les applications très mécaniques et thermiques
- les produits techniques comme les fibres de carbone et de graphite
- les feuilles de graphite et l'équipement de process.

Les anodes de carbone ou de graphite et les garnissages de four sont produits pour toute une variété de procédés de production de métaux ferreux et non-ferreux et sont consommés pendant la production des métaux. Plus de 2 000 autres produits de taille, de forme et de propriétés variables sont produits pour d'autres applications. Les matériaux en carbone et en graphite haute pureté sont essentielles pour la production des semi-conducteurs et des micro puces, les électrodes en graphite pour le recyclage des déchets d'acier et le carbone et le graphite très résistants aux produits chimiques sont utilisés pour la récupération des résidus et pour le traitement des polluants.

1.12.2 Sources des matériaux

La production des matières en carbone et graphite est principalement basée sur le coke de pétrole et le charbon et un coke hautement recuit basé sur le goudron de houille. Le brai de pétrole et le brai de houille sont utilisés en tant que liant, qui est finalement transformé en carbone ou graphite solide inerte. On utilise des systèmes de liant à base de résine, qui sont durcis avant l'application.

La qualité du coke varie en fonction de la source, mais le facteur le plus important est la teneur en soufre du coke étant donné que celui-ci sera émis en tant que dioxyde de soufre pendant la fabrication ou l'utilisation. Normalement, on utilise les cokes à base de pétrole ayant une teneur en soufre moyenne ou faible pour les produits principaux comme la pâte, les anodes et les électrodes.

Les propriétés des matières premières doivent être très constantes et sont contrôlées par des essais physiques et chimiques. Les nouvelles matières premières sont testées lors d'essais de production pour vérifier leur caractère approprié et pour ajuster les paramètres de production au nouveau matériau. La qualité finale des matières premières est uniquement basée sur la performance et l'acceptation du produit en carbone et en graphite.

On utilise d'autres matériaux dans la production des carbones spéciaux et ils comprennent les métaux et les poudres de métaux et toute une variété de résines.

1.12.3 Production et consommation

Le coke ou le carbone est habituellement lié avec le brai (14 à 18 % en poids) pour produire une pâte verte. Cette pâte subit alors un certain nombre d'étapes de formage, cuisson, imprégnation et graphitisation pour produire le produit final. La pâte verte est également utilisée directement pour les électrodes Söderberg. Le procédé de cuisson se traduit par une perte de poids d'environ 5 % de la masse du matériau. Le coke de revêtement est utilisé dans certains fours et dans ces cas, est consommé selon un rapport d'environ 14 kg/tonne de produit.

Le carbone et le graphite sont principalement consommés pendant leur application et transformés en dioxyde de carbone (c'est-à-dire, anode pour l'aluminium et électrode d'acier). La production d'acier consomme des électrodes de l'ordre de 1,5 à 3 kg/tonne d'acier. En raison de la réduction significative des taux de consommation dans certaines industries, les quantités de carbone et de graphite utilisées pour la production de l'aluminium et de l'acier ont été réduites.

L'étape et la taille du procédé varient selon le produit. L'industrie de l'aluminium est de loin la plus grande utilisatrice de matériaux carbonés en tant qu'anodes pré-cuites, pâte Söderberg et blocs de cathode. Généralement, les producteurs de graphite spéciaux sont de taille moins importante que les producteurs d'électrodes. Le tableau suivant représente la taille des différents secteurs de production.

Type de produit	Production t/an
Green mix pour électrodes Söderberg ou pâte	410 000
Anodes pour Al primaire	1 380 000
Électrodes	420 000
Carbone et graphite spéciaux	25 000

Tableau 1.29: Production annuelle de carbone et de graphite dans l'UE et en Norvège

1.12.4 Sites de production

Les produits en carbone et en graphite sont fabriqués sur 88 sites en Europe avec une capacité annuelle d'environ 2 millions de tonnes.

Pays	Green mix Pâte	Anodes	Électrodes, grandes formes	Carbone & graphite de spécialité
Autriche			15 (1)	0,2 (1)
Belgique			18 (1)	
Danemark				
Finlande				
France		214 (1)	62 (2)	16 (3)
Allemagne		450 (4)	117 (3)	6,2 (4)
Grèce		77 (1)		81
Irlande				
Italie		85 (1)	89 (2)	0,2 (1)
Luxembourg				
Pays-bas		479 (2)		
Portugal				
Espagne	81 (1)	100 (1)	52 (2)	
Suède	37 (1)	13 (1)	34	
Royaume-Uni	7 (1)	148 (3)	11 (1)	2,2 (1)
Islande				
Norvège	221 (3)	162 (2)		
Suisse				
Note : Le nombre entre parenthèses représente le nombre de producteurs dans l'UE				

Tableau 1.30: Production de carbone et de graphite en milliers de tonnes en 1998, dans l'UE

La figure suivante représente la répartition de l'industrie dans toute l'Europe.

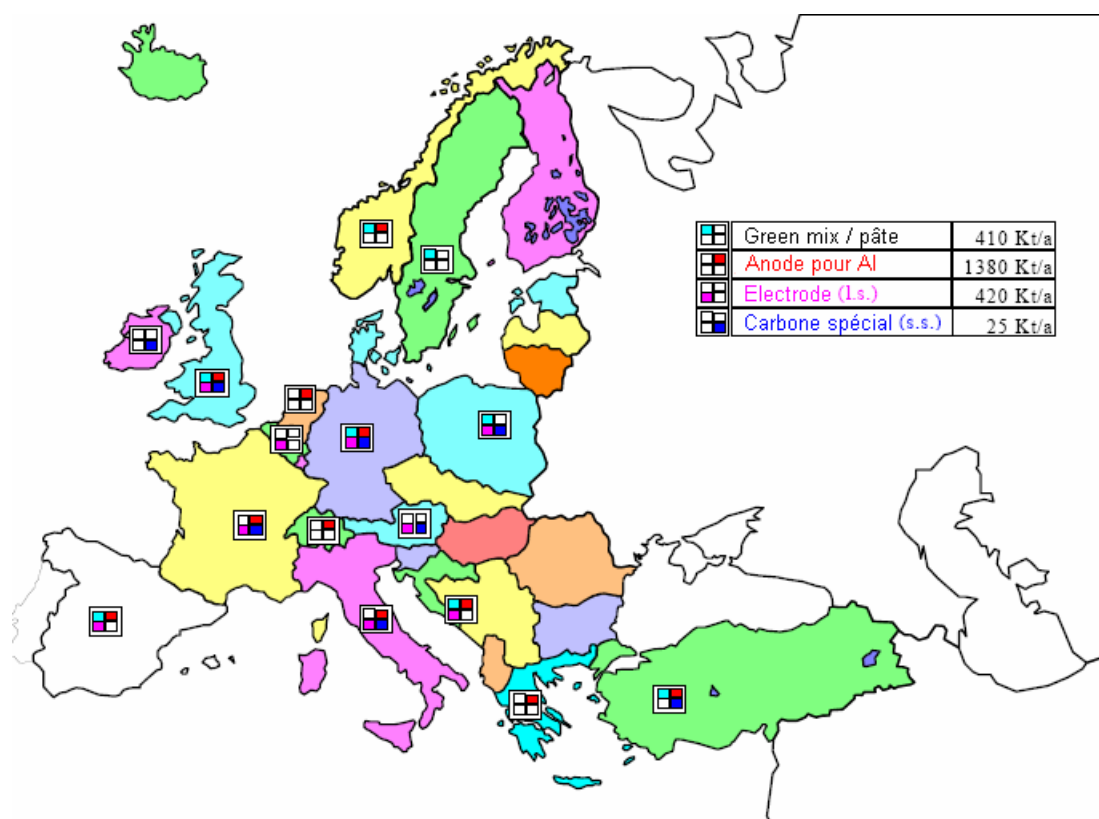


Figure 1.16: Sites de production européens de carbone et de graphite

Il existe une forte tendance à fermer la production d'anodes sur site et à passer à un approvisionnement hors site. Certains des plus gros producteurs sur site avec des capacités allant jusqu'à 150 000 tonnes par an fournissent également de plus petites fonderies d'aluminium primaire avec des anodes. La plus grosse usine de production de carbone en Europe et probablement au monde est située aux Pays-Bas avec une capacité de production de 340 000 tonnes par an qui va être portée à 375 000 tonnes par an. Néanmoins, les principales quantités d'anodes sont encore produites dans de nombreuses unités sur site.

Quelques sociétés produisent uniquement des cathodes, étant donné que l'industrie de l'aluminium demande un cycle de vie très élevé. Le cycle de vie d'un bloc d'anode va de 6 à 10 ans. Les propriétés doivent garantir une très bonne performance par rapport à la durée de vie, la résistance électrique et l'abrasion.

1.12.5 Problèmes environnementaux

L'impact environnemental principal de ces procédés est l'impact des émissions dans l'air des goudrons et des HAP, du dioxyde de soufre provenant du coke et des combustibles, et les composés organiques volatils provenant des agents d'imprégnation. On a développé toute une variété de nouveaux traitements de fumées pour détruire les goudrons et les HAP en utilisant de nouveaux systèmes de post-combustions.

Le problème environnemental principal pour la production du carbone et du graphite est l'utilisation de polyaromatiques, de mélanges complexes de liants et de brais d'imprégnation.

Les brais libèrent des composés d'hydrocarbures polynucléaires lorsqu'ils sont carbonisés. On utilise le benzo(a)pyrène en tant que substance guide pour surveiller la nature des émissions.

Les émissions se produisent pendant le stockage du brai, le mélange et la mise en forme, lors de la carbonisation dans les fours de cuisson et pendant l'imprégnation.

Si l'on utilise des coques avec une teneur en soufre plus importante ou des additifs sulfurés pendant la production des produits de carbone spécial, on peut former et dégager du dioxyde de soufre.

Les émissions de poussières ou de particules sont potentiellement importantes. Les matériaux à fine granulométrie ne sont normalement pas utilisés pour la pâte, la production d'anodes et d'électrodes, mais le sont pour d'autres produits.

Le progrès en matière de techniques appliquées pour contrôler l'impact sur l'environnement a été significatif.

La pollution de l'eau est en général un problème mineur de l'industrie du carbone étant donné que les procédés de production sont secs et utilisent généralement des systèmes d'eau de refroidissement limités. Exceptionnellement, on peut utiliser l'eau de surface pour le refroidissement lorsque ceci est approprié par rapport aux conditions locales.

Les efforts de l'industrie du carbone et du graphite pour recycler les matériaux de carbone (utilisés et non utilisés) et pour ouvrir de nouveaux domaines d'application de ces matériaux, en remplaçant d'autres sources naturelles, se sont avérés très fructueux.

2 EQUIPEMENT ET PROCÉDÉS COMMUNS

2.1 Organisation du chapitre

Il existe de nombreux procédés, des équipements et techniques variés utilisés pour la production des métaux non-ferreux. Ces procédés et cette variété doivent être traités de manière logique afin de pouvoir présenter clairement les informations. De nombreuses techniques et phases individuelles des procédés de production sont communs à la plupart des métaux non-ferreux produits et ces phases communes peuvent être décrites ensemble afin d'éviter les répétitions excessives. Les phases communes peuvent être divisées comme suit :

- gestion, conception et formation ;
- réception, stockage et manutention des matières premières ;
- pré-transformation et prétraitement des matières premières et transfert vers les procédés de production ;
- types de fours et techniques de contrôle des procédés ;
- collecte des fumées et techniques de dépollution ;
- réutilisation de l'eau et traitement des effluents ;
- prévention, réduction, recyclage et traitement des résidus des procédés (y compris les sous-produits et les déchets).

En outre, les aspects communs suivants sont couverts dans ce chapitre :

- mesure des émissions et utilisation des données relatives aux émissions ;
- récupération des chaleurs perdues et de l'énergie ;
- effets croisés ;
- nuisances sonores et vibrations ;
- odeurs ;
- démantèlement ;

Les techniques permettant de réduire l'impact environnemental d'une installation peuvent être classées en trois catégories :

- techniques de gestion (relatives aux systèmes et aux procédures de conception et d'exploitation d'un procédé et destinées aux opérateurs en formation et autre personnel) ;
- techniques intégrées aux procédés (relatives à l'utilisation de techniques pour éviter ou réduire les émissions provenant des activités telles que le stockage, la réaction, la séparation et la purification) ;
- réduction de l'énergie et techniques de dépollution (relatives aux techniques de traitement pour réduire les émissions dans l'air, l'eau et les sols).

Le présent chapitre décrit brièvement les techniques communes couvrant ces trois catégories utilisées dans ce secteur. Des indications sont fournies lorsque cela est possible sur les techniques permettant d'éviter ou de réduire les émissions dans chaque milieu environnemental. Ce chapitre indique également où ces techniques peuvent être utilisées dans les différentes phases de procédés pour améliorer les procédés existants. Ce sujet est développé dans les chapitres spécifiques aux métaux qui suivent.

Les **procédés de production métallurgiques** pour les 10 groupes identifiés par le Groupe de Travail Technique sont couverts dans les chapitres 3 à 12 respectivement. Les techniques à prendre en compte

dans la détermination des MTD dans ces chapitres incluent des descriptions de procédés plus détaillées, des exemples et des diagrammes. Elles fournissent également des détails supplémentaires sur le mode de fonctionnement des procédés intégrés et où les différences dans les techniques décrites au chapitre 2 sont employées, par ex. en quoi les fours diffèrent de la description générique. Cette approche a été employée pour réduire au minimum les descriptions répétitives et pour permettre le transfert des informations et des techniques parmi les dix groupes.

Les meilleures techniques disponibles ne sont pas spécifiées pour tous les procédés communs décrits dans le présent chapitre mais les différents procédés et techniques communs contribueront aux meilleures techniques disponibles décrites dans les chapitres 3 à 12. En outre, les techniques décrites dans ce chapitre sont également appropriées pour réduire les émissions globales et vont par conséquent avoir une influence sur la manière dont les installations existantes sont améliorées.

Le chapitre 2 doit être utilisé conjointement avec les chapitres 3 à 12 pour obtenir le cycle complet de production, par ex. les chapitres 2 et 3 fourniront l'ensemble de la production du cuivre et de ses alliages.

2.1.1 Installations produisant plusieurs métaux ou ayant des procédés associés sur site.

Un nombre important d'installations produisent un certain nombre de métaux issus de différents groupes ou peuvent avoir des procédés associés intégrés à celles-ci. Les exemples sont notamment la transformation de la bauxite dans un four de fusion d'aluminium, la présence d'une installation de production d'anode sur un site de production d'aluminium ou la production d'une gamme de métaux différents provenant de matières premières complexes en particulier le Cu, le plomb, le zinc et les métaux précieux.

Les éléments relatifs aux Sites Intégrés figurent dans les différentes parties du BREF par ex. détails relatifs aux boues anodiques dans la partie métaux précieux ; détails relatifs aux anodes précuites dans le chapitre 12 et autres métaux dans le chapitre spécifique relatif au métal. Le chapitre décrivant le métal principal contiendra certaines références à ces procédés par ex. production de boues anodiques dans le chapitre Cu et présence d'une installation d'anode dans le chapitre Al. Cette section sur l'intégration expliquera où ces sections et références croisées figurent et fournira des conseils sur la manière d'approcher une installation complexe.

Matériaux produits dans la même installation	Chapitres contenant les procédés et autres détails	Chapitres contenant une vue d'ensemble	Commentaires
Alumine issue de la bauxite sur un site de production d'Al	Chapitre 4 Aluminium	Chapitre 4 Aluminium	Intégré dans quelques installations
Anodes précuites produites sur un site de production d'Al	Chapitre 12 Carbone & Graphite	Chapitre 4 Aluminium	Facteurs de réduction commune pris en compte.
Plomb, zinc, métaux précieux avec la production de cuivre	Chapitre 5 Plomb, Zinc et Chapitre 6 Métaux Précieux	Chapitre 3 Cuivre (plus détails principaux sur le Cu)	Quelques duplications entre le Cu et les autres chapitres.
Nickel, cobalt et cuivre	Chapitre 3 Cu et Chapitre 11 Ni, Co	Chapitre 11 Ni, Co	
Mercure pendant la production d'autres métaux	Chapitre 7 Mercure Chapitre 2	Chapitre 3 Cu Chapitre 5 Pb, Zn	traitement du mercure provenant des gaz du four de fusion avant une installation de production d'acide.

FeCr, FeSi, FeMn etc.	Chapitre 9 Ferroalliages	Chapitre 9	Facteurs de réduction commune pris en compte. Récupération de l'énergie
Métaux réfractaires	Chapitre 8 Matériaux Réfractaires	Chapitre 8	
Ferro alliages et métaux réfractaires	Chapitres 8 et 9	Chapitres 8 et 9	

Tableau 2.1 : Procédés pouvant constituer des sites intégrées

2.2 Mesure des émissions et utilisation des données relatives aux émissions

Cette section est destinée à garantir que les émissions déclarées dans ce document sont mesurées de manière à ce que les résultats soient représentatifs, mutuellement comparables et décrivent clairement l'état d'exploitation pertinent de l'installation. Il est nécessaire que les méthodes et instruments utilisés soient les Méthodes nationales ou internationales correspondantes (par ex. European Committee for Standardisation [CEN] ; ISO ; Directives du VDI ; Netherlands Emission Regulations - Ch4 [NER] ; UK Guidance Notes : British Standards etc.). Les principes généraux sont fournis ci-dessous.

2.2.1 Mesure des émissions

La mesure des émissions est utilisée pour déterminer les substances dans le gaz propre ou les eaux usées de façon à ce qu'elles puissent être déclarées, utilisées pour contrôler le procédé ou le système de dépollution ou utilisées pour prévoir un impact environnemental. Les émissions fugitives (non captées) peuvent également être calculées durant la mesure. Avant la mesure, il peut être prévu de tenir compte :

- du mode d'exploitation,
- de l'état d'exploitation des installations de traitement des émissions gazeuses ou de traitement des effluents liquides,
- des conditions d'exploitation dans l'installation (continues, discontinues, opérations de démarrage et d'arrêt, changement de charge) et
- de l'effet des facteurs d'interférence thermodynamiques.

Ces facteurs peuvent alors constituer la base de sélection des conditions d'exploitation auxquelles :

- les émissions les plus élevées peuvent être enregistrées,
- le nombre et la durée des mesures sont choisis,
- la méthode la plus appropriée de mesure est choisie, et
- la position des emplacements et points de mesure sont fixés.

Pour les rejets d'eaux usées, ce sont ces échantillons aléatoires qui peuvent être utilisés ou bien des échantillons composites de 24 heures basés sur un échantillonnage proportionnel au flux ou moyenné.

Pour des procédés fonctionnant en continu, un temps de prélèvement minimal des échantillons ou un temps de mesure d'une demi-heure (valeur moyenne d'une demi-heure) est généralement nécessaire. Si les teneurs en poussières sont basses ou si les PCDD/PCDF doivent être déterminés, des temps de mesure plus longs et par conséquent d'autres temps de référence peuvent être nécessaires en raison des limites de détection. L'échantillonnage ou la mesure doivent être effectués durant le fonctionnement du procédé et l'air de dilution doit être exclu. Pour les procédés fonctionnant en continu, lorsqu'il n'y a que de légères fluctuations dans les caractéristiques d'émissions, 3 mesures individuels peuvent être réalisés au niveau d'émission le plus élevé. S'il est prévu que le niveau d'émission variera fortement

dans le cas d'un procédé fonctionnant en continu, plusieurs mesures peuvent être réalisées, l'échantillonnage et le temps moyen étant limités à la phase d'émission.

Pour un procédé fonctionnant en discontinu, le temps de mesure et le temps moyen doivent être modifiés de façon à ce qu'un ou des échantillon(s) puisse(nt) être prélevé(s) sur tout le lot. Ces résultats peuvent être utilisés pour calculer des moyennes ou pour montrer les moments où les pics ont lieu pendant le cycle. De nouveau, il faut que l'échantillonnage ou les mesures soient uniquement réalisés pendant des périodes d'exploitation et que l'air de dilution soit exclu.

2.2.1.1 Points d'échantillonnage

Les points d'échantillonnage doivent satisfaire les exigences des Lignes Directrices Nationales correspondantes. Il faut normalement que les points d'échantillonnage :

- soient clairement marqués,
- si possible, s'écoulent sans perturbations dans la section de mesure,
- aient des points de surveillance qui peuvent être fermés,
- aient les alimentations en énergie requises,
- aient des plateformes de travail suffisamment grandes, et
- garantissent que les exigences de sécurité au travail sont satisfaites.

2.2.1.2 Composés et paramètres

Les composés les plus courants mesurés dans l'industrie des métaux non-ferreux comprennent les poussières, les métaux, le dioxyde de soufre, le carbone total (également les COV, les goudrons et les hydrocarbures), les dioxines, les oxydes de carbone et les oxydes d'azote. Les acides tels que l'HCl et l'HF sont calculés pour certains procédés comme le sont les chlorures et les fluorures. Les éléments spécifiques à déterminer comprennent les PFC et les HAP pour l'aluminium primaire, les HAP pour le carbone et le graphite et certains éléments qui sont spécifiques à certains des réactifs utilisés pour la production des métaux précieux. Les composés figurent dans les Chapitres Spécifiques aux Métaux, les méthodes d'analyse sont fournies dans les Lignes Directrices Nationales et Internationales correspondantes relatives à la surveillance et à l'analyse.

L'analyse de certains paramètres peut être couverte par des méthodes établies par d'autres organismes comme l'OSPARCOM. Dans ce cas particulier, au moment de la rédaction, plusieurs des méthodes utilisées dans l'échantillonnage et la mesure des émissions de la production primaire d'aluminium et de la production d'anodes précurtées sont définies par l'OSPARCOM ou sont soumises à évaluation. La mesure et la détermination des HAP fait notamment l'objet d'une révision. Le nombre de HAP à déterminer et le protocole de déclaration d'une partie ou de la totalité d'entre eux sont incertains au moment de la rédaction et la future recommandation de l'OSPARCOM devrait permettre de résoudre ce problème.

2.2.1.3 Conditions de référence

Pour les émissions dans l'air, les paramètres suivants relatifs aux gaz doivent également être déterminés pour convertir les concentrations d'émission obtenues en conditions standards de 273 K, 101,3 kPa, teneur en oxygène mesurée et gaz secs :

- le débit volumique des effluents gazeux (afin de calculer la concentration et le flux massique des émissions),
- la température des effluents gazeux,
- la teneur en vapeur d'eau des effluents gazeux,

- la pression statique dans la cheminée et
- la pression atmosphérique.

La cadence de production peut également être déclarée de façon à ce que les émissions puissent également être déclarées comme émissions spécifiques par tonne de métal. Le volume de gaz spécifique en m³ par tonne de métal peut également être calculé.

2.2.1.4 Mesure en continu

La mesure en continu de certains composés dans les gaz ou dans les eaux usées est possible et dans certains cas, des concentrations précises peuvent être déclarées en continu ou comme valeurs moyennes sur des périodes de temps définies (toutes les demi-heures, journalières, etc.). Dans ces cas, une analyse des moyennes et l'utilisation de percentiles permet d'obtenir une méthode flexible pour démontrer la conformité aux conditions d'autorisation et les moyennes peuvent être évaluées de manière simple et automatique.

Des méthodes sont disponibles pour la mesure en continu :

- des poussières,
- du SO₂,
- des NO_x,
- du CO,
- du fluor et de ses composés,
- du chlore et de ses composés,
- du carbone total.

Les autorités compétentes peuvent exiger une mesure en continu en fonction du débit massique du polluant. La conductivité, la turbidité, le pH et certaines espèces ioniques peuvent être mesurés en continu pour l'eau.

Même dans les cas où des valeurs absolues peuvent ne pas être acceptées comme fiables, l'utilisation de la surveillance continue peut être employée pour fournir les tendances des émissions et comme paramètres de contrôle pour le procédé ou le système de dépollution et est par conséquent très importante.

Certains paramètres physiques peuvent également être utilisés pour indiquer la présence de certains composés dans le flux gazeux. Par exemple, la présence d'un effet d'anode peut indiquer la production de PFC en production d'aluminium primaire et, la température et la teneur en oxygène et en poussières des gaz peuvent indiquer la destruction des dioxines. Le pH peut également être utilisé pour indiquer la précipitation réelle des métaux.

2.2.2 Déclarations des données relatives aux émissions

Tout rapport et protocole de mesure établi doit se conformer aux Lignes Directrices Nationales et Internationales en vigueur.

Le rapport peut indiquer :

- l'objectif,
- des informations générales sur les mesures,
- une description de l'installation, son état et les données relatives à l'exploitation,
- les conditions d'exploitation durant la mesure,

- des informations sur le calendrier de mesure,
- les points d'échantillonnage,
- les méthodes de mesure,
- une présentation sous forme de tableau des mesures individuelles comprenant les températures, les flux gazeux ou les volumes,
- une évaluation des résultats,
- la prise en compte des erreurs,
- la présentation des mesures d'assurance qualité, et
- un résumé.

Les données actuelles sur les émissions dans le présent document sont normalement déclarées en moyennes horaires ou journalières ou en émissions massiques par tonne unitaire de production, la dilution des gaz ou des eaux usées n'étant pas considérée comme acceptable. Les deux méthodes de déclaration sont utiles pour définir la performance et l'impact d'un procédé. Les autorités compétentes emploient normalement les unités de concentration (mg/Nm^3 ou mg/l) et/ou les facteurs d'émissions spécifiques (g/t de métal) dans leurs autorisations ou dans les données déclarées pour les émissions. Les deux formes de données peuvent être liées à condition que des données soient disponibles pour les volumes de gaz de toutes les phases de procédé. Ce n'est pas toujours le cas et par conséquent dans le présent document, les émissions liées à l'utilisation des MTD sont normalement fournies en moyennes de concentration journalière basées sur la surveillance continue pendant la période d'exploitation. Les conditions normalisées de 273 K, 101,3 kPa, teneur en oxygène mesurée et gaz secs, sont utilisées.

Dans les cas où il est impossible de réaliser une surveillance continue, la valeur sera la moyenne sur la période d'échantillonnage. Les concentrations des métaux ou d'autres substances dans l'eau ou dans les eaux usées sont indiquées comme un total des matières solubles et insolubles. Les émissions dans l'eau qui ont été déclarées ou qui sont liées aux MTD sont basées sur un échantillon prélevé au hasard ou sur un échantillon composite de 24 heures.

Au moment de la rédaction du présent document, les données fournies n'étaient pas suffisamment fiables pour que les émissions spécifiques liées aux MTD puissent être déclarées en complément des concentrations

2.2.2.1 Interrelations entre la concentration et les émissions spécifiques.

Lorsque des informations sont disponibles, une interrelation peut être fournie pour transformer les unités de concentration en facteurs d'émissions spécifiques. Les données relatives aux émissions sous les deux formes sont très utiles pour l'organisme législateur et l'opérateur. Toutefois, lorsque l'on compare ou convertit les données dans ces formes, il faut particulièrement veiller à prendre en compte les émissions fugitives (émissions non captées). Les émissions fugitives peuvent former la majeure partie des émissions totales, en fonction du procédé.

Dans l'exemple suivant, une conversion simple d'émissions moyennées annuellement est utilisée pour montrer comment convertir la concentration du polluant concerné (mg/Nm^3) en charge volumique spécifique (m^3/t de métal) et en facteur d'émission spécifique (g/t de métal). Pour un site complexe, le total de tous les métaux produits est normalement utilisé pour présenter les émissions spécifiques.

a) concentration de poussières mesurée sur une base annuelle, disponible normalement comme plage issue d'une surveillance continue (mg/Nm^3)

b) concentration de poussières moyenne annuelle (mg/Nm^3)

c) débit volumique d'effluents gazeux par heure (Nm^3/h)

d) durée d'exploitation annuelle (h/a)

$$c \times d = e$$

e) volume d'effluents gazeux annuel (Nm^3/a)

$$b \times e = f \text{ mg/a}$$

f) émission de poussières annuelle (kg de polluant/a)

g) capacité de production annuelle (t de métal/a)

$$e \div g = h$$

h) volume d'effluents gazeux spécifique (Nm^3/t)

$$f \div g = i \text{ kg/t}$$

i) facteur d'émission spécifique (kg/t de métal)

Ces calculs sont basés sur les connaissances fiables des données suivantes :

- concentration de poussières sur une base annuelle moyenne (mg/Nm^3),
- débit volumique d'effluents gazeux (Nm^3/h),
- durée d'exploitation annuelle (h/a),
- capacité de production annuelle (t de métal/a).

Les interrelations ci-dessus sont basées sur la connaissance des valeurs mesurées, par exemple la plage de concentrations de poussières annuelles et le débit volumique réel, qui doivent alors être transférées en moyennes annuelles. Les résultats de ces calculs sont valables uniquement pour les émissions captées et sont basés sur des valeurs moyennes.

Dans le cas d'une nouvelle installation ou d'une modification importante d'une installation existante, l'interrelation ci-dessus peut être basée sur des valeurs calculées ou estimées de manière théorique. Les données doivent tenir compte de toute incertitude de mesure, par exemple du volume d'effluents gazeux issu de tout procédé simple avec la composition du concentré. Le fait de se fier aux capacités des ventilateurs peut conduire à des erreurs d'évaluation étant donné que l'on utilise couramment des ventilateurs à vitesse variable. Ce problème de mesure du volume se pose également dans l'estimation des émissions non captées ou fugitives, l'échantillonnage et la mesure des gaz fugitifs sont également incertains au moment de la rédaction du présent document.

2.2.2.2 Utilisation des données relatives aux émissions

Lorsque des informations sont disponibles, le calcul des émissions de poussières annuelles (kg/a) et des facteurs d'émissions spécifiques d'un polluant (g/t de métal produit) permet :

- d'identifier l'importance des sources individuelles d'émissions dans l'air et l'eau soit au sein d'une installation soit entre des installations ;
- de déclarer les émissions fugitives en émissions massiques par unité de temps ou en masse par tonne de métal produit. Voir la section 2.7 ;

- de fournir une base permettant de définir des priorités pour la gestion environnementale future d'une installation ou l'application d'un « concept de bulles » pour les émissions dans l'air ou l'eau sur un site complexe si souhaité.

Le tableau suivant fournit des chiffres relatifs aux émissions de poussières annuelles provenant de certaines parties d'un procédé de production de cuivre primaire [tm 213, PRAM 1999] produisant 170 000 t/a de cuivre blister.

Système	Facteur d'émission spécifique des poussières [g/t de Cu]
Séchoir	0,2
Four de grillage	1,5
Filtre de cuve de convertisseur	0,7
Granulation	0,1
Granulation du laitier	7,2
Machine de coulée d'anode	36,7
Ventilation de l'atelier	19,3

Tableau 2.2 : Exemple de données permettant de définir les priorités

Dans ce cas particulier, l'équation $[b \times e = f]$ permet de calculer l'émission spécifique de poussières et de conclure que la machine de coulée de l'anode et la ventilation de l'atelier sont les plus importantes sources unitaires d'émissions de poussières et que l'on peut leur donner priorité.

- Les effets à long terme et à longue portée des émissions peuvent être déterminés en utilisant la modélisation par dispersion et d'autres techniques.

L'utilisation de grandes cheminées permet d'améliorer la dispersion des gaz, par conséquent, les impacts environnementaux peuvent aller bien au-delà de l'installation. Les composés tels que le dioxyde de soufre peuvent avoir une très longue portée, des effets cumulatifs et dans certains cas « des charges critiques » pour certaines espèces peuvent être dépassées pour certains polluants. La dispersion ne constitue donc pas un substitut aux émissions faibles.

L'utilisation de concentrations basées sur des paramètres définis et des méthodes de mesure permet de surveiller de nombreux paramètres en continu. Ces paramètres peuvent être associés au système de dépollution employé. La mesure de la concentration permet:

- de démontrer facilement la conformité,
- de démontrer la performance en « temps réel »,
- un haut degré de contrôle de la dépollution et une alerte anticipée de la défaillance d'un équipement,

2.3 Systèmes de gestion

Une gestion efficace est nécessaire pour obtenir une bonne performance environnementale. Cette composante essentielle des MTD, fait partie de la définition des techniques fournies à l'Article 2 de la Directive.

Les travaux entrepris pour la préparation du présent document ont montré qu'il existe un grand nombre de différences considérables entre la performance environnementale d'un procédé qui est géré et exploité de manière correcte et un procédé identique géré et exploité de façon médiocre. Les systèmes de gestion et de communication font partie des facteurs les plus significatifs dans cette différence.

Parvenir à une bonne performance implique un engagement à tous les niveaux au sein d'une entreprise, au niveau du Conseil ou de sa politique, et comprend le management du site, la supervision et les opérateurs. Le système doit établir des objectifs, définir des cibles et communiquer les instructions et les résultats. Les Systèmes de gestion environnementale tels que la norme ISO14001 et la norme EMAS ou un système de gestion de la qualité tel que la norme ISO 9000 peuvent contribuer à formaliser le système.

Bien que n'étant pas une exigence de la Directive, il est nécessaire qu'une installation considère les bénéfices pouvant résulter de l'adoption d'un tel système. Les techniques employées peuvent également améliorer la performance économique en augmentant l'efficacité opérationnelle, en réduisant les coûts tels que les coûts énergétiques ou de mise en décharge et améliorer les rendements de production des métaux. Ces techniques sont par conséquent des facteurs essentiels pour une installation moderne.

2.3.1 Politique de gestion et engagement

Un système de gestion efficace peut comprendre les facteurs suivants :

- Identification de tous les impacts sur la santé, la sécurité et l'environnement des activités, des produits et des procédés ;
- Un engagement à développer et mettre en place les mesures identifiées ;
- La communication de la politique aux employés et contractants afin de s'assurer qu'ils sont conscients de l'engagement et impliqués dans sa réalisation ;
- L'utilisation d'une structure claire pour gérer les questions environnementales et qui soit totalement intégrée aux systèmes décisionnels appliqués à toute l'entreprise et au site ;
- La performance environnementale du procédé dépend fortement de l'attention et de la prise de conscience de l'opérateur du procédé. Il est important qu'il soit conscient de son rôle dans la performance environnementale ;
- La performance environnementale générale peut être surveillée régulièrement et les résultats peuvent faire partie du processus d'évaluation de la gestion. Les indicateurs de performance environnementale peuvent être transmis et distribués aux opérateurs, et des retours fournis par les opérateurs peuvent être obtenus et utilisés ;
- Des plans prévisionnels peuvent être préparés pour identifier les types potentiels d'incidents pouvant se produire et pour fournir des lignes directrices claires sur la manière de les gérer et à qui en attribuer la responsabilité. Des procédures peuvent être préparées pour identifier, répondre et tirer les enseignements de toutes les plaintes et incidents ;
- Lorsque de nouveaux procédés sont mis en service ou lorsque des procédés existants sont remis en service après modifications, il est possible de préparer un plan de mise en service qui identifie

clairement les problèmes et la/les personnes responsable(s) de la performance environnementale du procédé durant la période de mise en service.

2.3.2 Conception et maintenance

La Directive exige d'atteindre un « haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble ». La conception et la maintenance constituent le facteur d'influence le plus important sur la satisfaction de cette exigence en fixant l'effet d'une installation existante ou de tout procédé nouveau ou substantiellement modifié sur le degré de protection de l'air, de l'eau et des sols. Cette exigence peut être respectée comme suit :

- Les implications environnementales (dont le bruit) d'un procédé nouveau ou substantiellement modifié ou d'une matière première doivent être prises en compte dès les premières phases du projet et continuer d'être revues à intervalles réguliers par la suite. Il s'agit du moment le plus rentable pour introduire des améliorations dans la performance environnementale globale. Un audit de la conception et du processus décisionnel constitue une méthode utile pour montrer comment les différentes options de procédé et de dépollution ont été prises en compte. Les questions relatives à la mise en service doivent être planifiées pour les installations nouvelles ou modifiées ;
- Il faut tenir compte des émissions fugitives potentielles à toutes les phases ;
- Il est recommandé d'utiliser et d'enregistrer un programme de maintenance préventive. Celui-ci doit être couplé avec des essais de diagnostic lorsque cela est approprié ;
- Les systèmes d'extraction des locaux doivent faire l'objet d'un examen régulier et les défaillances ou les dommages doivent être immédiatement réparés ;
- Tout le personnel doit être conscient de son rôle en maintenant la vigilance, par exemple, par rapport aux dommages sur les hottes et les conduites ou les défaillances de l'installation. Il est nécessaire que des procédures appropriées soient employées pour encourager l'implication du personnel et sa réaction aux rapports ;
- Une procédure interne doit être employée pour autoriser les modifications et entreprendre des vérifications à la suite des modifications, avant de démarrer un procédé.

2.3.3 Formation

- Il est essentiel que l'ensemble du personnel soit conscient des implications sur l'environnement du procédé et de leur travail ;
- Il est recommandé d'établir clairement les savoir-faire et compétences requis pour chaque poste ;
- La formation fournie aux employés impliqués dans le fonctionnement des procédés doit comprendre les implications environnementales de leur travail et les procédures de gestion des incidents ;
- L'enregistrement de la formation fournie au personnel travaillant sur les procédés peut être très utile pour garantir une formation progressive et complète ;
- La formation des autres départements sur les questions et conséquences environnementales qui touchent l'installation peut être également efficace pour éviter les conflits affectant la performance environnementale. Par exemple, les équipes du service financier et des ventes peuvent avoir une influence considérable sur cette performance. Ainsi, des mesures de comptabilité complètes peuvent identifier l'utilisation excessive de matières premières et identifier les véritables coûts énergétiques et de mise en décharge pour les différentes étapes du procédé ; des livraisons et ventes imprévues peuvent provoquer des ruptures de production et des incidents.

2.4 Réception, stockage et manutention des matières premières et des déchets

Les principales matières premières utilisées pour la production des métaux non-ferreux sont les minerais et les concentrés, les matières premières secondaires, les combustibles (pétrole, gaz et combustibles solides) et les gaz de procédé (comme l'oxygène, le chlore et les gaz inertes). D'autres matériaux tels que les fondants, les additifs et les produits chimiques de procédé (par ex. pour les systèmes de dépollution) sont également utilisés. Cette variété de matériaux comporte de nombreux problèmes de manutention et de stockage et la technique spécifique employée dépend des propriétés physico-chimiques du matériau. L'étude a permis de constater que les techniques suivantes sont utilisées.

2.4.1 Procédés et techniques appliqués

2.4.1.1 Minerais et concentrés

Les minerais et concentrés peuvent être livrés sur le site par route, par rail ou par bateau. Les systèmes de collecte et de traitement des poussières sont largement utilisés en ces endroits.

Le contrôle des procédés prend de plus en plus d'importance pour améliorer l'efficacité de conversion, réduire la consommation d'énergie et réduire les émissions et est fréquemment basé sur un échantillonnage, une analyse et un enregistrement efficaces des matières premières pour établir des conditions d'exploitation optimales. Cela influe sur le choix des techniques de stockage et de manutention.

Le déchargement, le stockage et la distribution des matériaux solides sont réalisés par des techniques similaires à celles utilisées pour les combustibles solides. Généralement, des méthodes de confinement plus contraignantes sont adoptées pour ces matériaux car ils sont généralement plus réactifs, ont des tailles de particules plus petites et peuvent se retrouver plus facilement en suspension dans l'air ou dans l'eau. Des dispositifs à scellement automatique rapide sont couramment employés. Des fondants et des agents favorisant la formation de laitier sont également reçus sur site et manipulés de la même manière que les minerais et concentrés.

Les minerais ou les concentrés (s'ils forment des poussières) et les autres matériaux poussiéreux sont généralement stockés dans des bâtiments fermés. Des tas enfermés et sous abri et des silos sont également utilisés. Les tas utilisés à l'extérieur sont destinés aux matériaux de grande taille et grumeleux mais ils sont généralement disposés sur une surface étanche et dure comme le ciment afin d'éviter les pertes de matériau, la contamination des sols et la contamination du minerai. Certains matériaux de grande taille ne sont pas stockés sur une surface dure car les dommages se produisant sur les surfaces sont fréquents et provoquent des problèmes non visibles. Des travées sont souvent utilisées pour séparer les différentes qualités de minerais.

Les installations de grande taille utilisent normalement les minerais et concentrés ; par conséquent les silos ne sont pas fréquemment utilisés pour le stockage primaire mais peuvent être utilisés pour le stockage intermédiaire et la préparation des mélanges de minerais/fondants. Des systèmes de silos à « perte de poids » et des bascules à bande sont utilisés pour doser les minerais et les fondants afin d'obtenir des mélanges optimaux et efficaces et d'améliorer le contrôle des procédés.

Des pulvérisateurs d'eau sont fréquemment utilisés pour supprimer les poussières mais certains opérateurs ont besoin d'une charge sèche pour les procédés et sont réticents à utiliser des pulvérisateurs d'eau. Des méthodes alternatives comme l'utilisation d'atomisateurs pour produire des brouillards d'eau fins sont utilisés pour supprimer les poussières sans humidifier le matériau de manière excessive. Certains concentrés contiennent naturellement suffisamment d'eau pour éviter la formation de poussières.

Des agents de scellement (tels que la mélasse, la chaux ou l'acétate de polyvinyle) peuvent être utilisés pour éviter la formation de poussières en conditions de vent. Le scellement peut éviter l'oxydation des couches superficielles et la lixiviation du matériau vers le sol ou les eaux souterraines qui en résulte.

Le déchargement des matériaux peut constituer une source potentielle d'émissions importantes de poussières. Le principal problème se produit lorsqu'un véhicule sur rail ou un autre véhicule à bascule décharge par gravité. La vitesse de déchargement n'est pas contrôlée et provoque un volume important d'air et de poussières qui peut surcharger les systèmes d'extraction des poussières. Des halles de livraison fermées avec une fermeture par porte automatique sont utilisées.

Des écrans de polycarbonate créant une étanchéité contre le véhicule à bascule sont utilisés. Dans ce cas, l'air déplacé passe à travers une section élastique et un conteneur intermédiaire pour absorber l'énergie du déchargement ; l'augmentation du volume d'air est amortie, permettant au système d'extraction d'air de fonctionner correctement.

Les matériaux peuvent être récupérés par un convoyeur alimenté par le bas, une grue à benne ou un chargeur frontal, des convoyeurs entièrement fermés sont utilisés pour transporter les matériaux formant des poussières. Le transfert par des systèmes pneumatiques à phase dense est également employé. Pour les matériaux formant des poussières, des systèmes d'extraction et de filtration peuvent être utilisés pour traiter les poussières provenant des points de déchargement fixes et des points de transfert de convoyeur. En cas d'utilisation de convoyeurs ouverts, des poussières peuvent se produire si la bande fonctionne trop rapidement (c'est à dire à plus de 3,5 m/s). Lorsqu'un chargeur frontal est utilisé, des poussières peuvent être générées sur toute la distance de transport.

Des matériaux solides peuvent adhérer aux roues et à d'autres parties du véhicule et vont contaminer la route à la fois sur le site et en-dehors de celui-ci. L'utilisation d'installations de lavage des roues et du châssis (ou d'autres techniques de nettoyage en cas de températures très basses) pour décontaminer les véhicules, est fréquente.

Des balayeuses ou d'autres équipements spécialisés utilisant une combinaison de jets d'eau et d'aspiration sous vide sont couramment utilisés pour maintenir les routes internes propres.

Les matériaux qui contiennent des composés présentant un degré de risque élevé pour l'environnement, par ex. le plomb et le cadmium, sont traités avec les mesures les plus efficaces.

2.4.1.2 Matières premières secondaires

Ce secteur est particulièrement important en matière de récupération de métaux à partir de nombreuses sources et par conséquent utilise une gamme importante de matières premières secondaires. Les déchets métalliques, les laitiers, les poussières récupérées sous filtres sont utilisés comme sources de métaux non-ferreux et ces matériaux contiennent un certain nombre de métaux et de composés métalliques. Les matières premières secondaires sont également employées dans certains procédés primaires.

La source de la matière première secondaire peut fournir des informations sur les émissions potentielles dues à la présence d'acides, d'huiles, de contaminants organiques (pouvant produire des dioxines pendant les procédés de fusion), d'anions et de composés tels que l'ammoniac produit par la réaction des laitiers avec l'humidité. Cela a une influence directe sur les émissions potentielles dans l'air, l'eau et le sol et n'importe quel composé présent dans ces matériaux peut être émis. Les matériaux sont contrôlés (par ex. par inspection et tri) afin de vérifier les impuretés et les contaminations non détectées, ce qui peut être rentable pour maintenir un produit plus propre et réduire les émissions.

L'état physique du matériau a également des conséquences sur les méthodes de stockage et de manutention. Ces matériaux peuvent être poussiéreux, huileux et varier en grosseur, depuis des poussières fines à des composants entiers. Ces facteurs ont une influence sur les méthodes employées pour la livraison, la manutention et le stockage. Les techniques employées pour les matières premières primaires sont utilisées conjointement à celles ci-dessous.

Les matières premières secondaires peuvent être livrées sur site comme matériau en vrac, en sacs ou en fûts. L'état physique du matériau conditionne les méthodes de livraison et de stockage utilisées. La source du matériau a également un impact significatif et plusieurs méthodes sont disponibles pour qualifier le matériau. Un contrôle de la qualité et une analyse du matériau sont effectués dans la plupart des cas.

Les composants de grande taille et les matériaux comme les copeaux ou les résidus de broyage sont stockés sur des surfaces cimentées qui peuvent être ouvertes, sous abri ou à l'intérieur de bâtiments. Certains matériaux de grande taille ne sont pas stockés sur une surface dure car la surface peut être endommagée. Les matériaux sont généralement stockés en tas séparés pour maintenir les différentes qualités et compositions d'alliages à part.

Les matériaux poussiéreux et les laitiers sont également stockés dans des tas séparés qui peuvent être ouverts, sous abri ou à l'intérieur de bâtiments. Ces matériaux peuvent être pyrophores ou réagir avec l'humidité pour former de l'ammoniac ou des gaz tels que l'arsine ou la stibine, en fonction de leur composition. La méthode de stockage prend par conséquent ces facteurs en considération. Les matériaux poussiéreux froids peuvent être recouverts de matériaux tels que de la mélasse pour former une couche granulée sèche qui ne forme pas de poussières. Le produit de revêtement ne doit pas affecter les procédés pyrométallurgiques.

Les matières premières secondaires peuvent être contaminées par un grand nombre d'autres matériaux, comme des huiles, des acides ou des matières organiques qui peuvent être emportés dans les systèmes d'évacuation. La contamination potentielle de la pluie et d'autres eaux par de tels contaminants est prise en compte dans la conception des méthodes de stockage et du traitement des eaux évacuées de ces zones. Des zones protégées, des sols étanches et des intercepteurs d'huile sont utilisés pour empêcher les émissions dans l'eau.

Les matériaux sont manipulés selon différentes méthodes en fonction du stockage. Des grues, des convoyeurs et des pelles sont utilisés. Les matières secondaires ont souvent besoin d'être mélangées avant traitement ou prétraitement et un stockage intermédiaire est utilisé.

Les matières secondaires qui contiennent des composés ayant un degré de risque élevé pour l'environnement par ex. le plomb et le cadmium, sont traitées avec les mesures les plus efficaces.

2.4.1.3 Combustibles

Le combustible peut être utilisé directement comme source de chaleur, comme réducteur ou les deux. Ceci doit être identifié pour chaque installation. Les combustibles peuvent être livrés sur le site par des conduites, par route, par rail ou par bateau. Les méthodes employées pour la livraison n'entrent pas dans le champ d'application du présent document mais l'utilisation du transport routier pour les livraisons fréquentes peut provoquer des nuisances sonores et des congestions du trafic.

La livraison et le stockage du combustible sont généralement contrôlés par l'opérateur pour éviter les déversements et les fuites, les techniques employées incluent notamment celles qui suivent :

a) Combustibles liquides

Les citernes par route et par rail sont les plus couramment utilisées pour la livraison. Les systèmes de stockage sur site utilisent des réservoirs de stockage à toit flottant ou ventilés situés dans des zones étanches ou des enceintes ayant un volume suffisant pour accueillir le contenu du réservoir de stockage le plus grand (ou 10% du volume total des réservoirs individuels s'il est supérieur). Des intercepteurs d'huile efficaces sont utilisés pour empêcher le déversement d'huile dans les eaux d'évacuation du site.

La ventilation des gaz du réservoir de stockage en les renvoyant au réservoir de livraison est fréquemment pratiquée sauf si des réservoirs de stockage à toit flottant sont utilisés. Lorsque des liquides ou des gaz liquéfiés sont livrés, on utilise une fermeture automatique des tuyaux de raccordement. Les raccords servant à la livraison sont placés à l'intérieur de l'enceinte fermée.

Les vérifications régulières du contenu des réservoirs pour identifier les fuites et le volume de sécurité pour réception sont une pratique courante. Des alarmes sont utilisées et des atmosphères inertes sont occasionnellement employées.

Des conduites peuvent également être utilisées pour la livraison de combustible liquide et peuvent comprendre un stockage en réservoir intermédiaire. La distribution du combustible depuis les réservoirs de stockage du site au procédé se fait généralement par des conduites aériennes, des tranchées de service ou moins couramment par des conduites enterrées. Des barrières sont employées pour protéger les conduites aériennes contre les dommages. L'utilisation de conduites souterraines empêche l'identification immédiate de fuites de combustible pouvant provoquer la contamination des eaux souterraines.

S'il existe un risque de contamination des eaux souterraines, la zone de stockage doit être imperméable et résistante au matériau stocké.

b) Combustibles gazeux

Les conduites sont le système de livraison le plus courant pour les combustibles gazeux. Bien que le GPL puisse être classé comme un liquide, on utilise les mêmes techniques. Les gaz de procédé seront traités ultérieurement.

Certains procédés pyrométallurgiques (c'est-à-dire la production carbo-thermique de ferroalliages dans des fours à arc électrique immergés fermés) produisent des effluents gazeux riches en monoxyde de carbone comme sous-produit. La quantité de CO dépend fortement du métal et du procédé de production. Les effluents gazeux peuvent contenir du CO depuis des quantités faibles (gaz à CV faible) jusqu'à 90% (gaz à CV élevé). Les effluents gazeux sont traités (c'est à dire par laveur humide à plateaux) puis distribués à travers le site comme combustible secondaire ou vendu aux usines voisines. Le gaz en excès peut être utilisé pour la production d'électricité ou brûlé à la torche.

Un détendeur ou occasionnellement un compresseur est souvent associé à la livraison de gaz. Dans tous les cas, le contrôle de la pression et du volume est fréquemment pratiqué pour identifier les fuites et des dispositifs de surveillance des gaz sont parfois utilisés pour surveiller le poste de travail et le voisinage des réservoirs de stockage.

Une fois encore, la distribution sur site par des conduites aériennes ou des conduites en tranchées de service est courante, des méthodes de protection contre les dommages sont employées.

c) Combustibles solides

Les livraisons sont effectuées par route, par rail ou par bateau. Le stockage en silos, en tas enfermés ou à ciel ouvert et dans des bâtiments est employé en fonction du type de combustible (par ex. coke, charbon, etc.) et sa tendance à former des poussières.

Les tas à ciel ouvert ne sont pas utilisés fréquemment mais ceux qui existent sont conçus pour offrir une pente au vent plane et peuvent avoir des murs de retenue pour réduire l'effet du vent et contenir le matériau. Les matériaux peuvent être récupérés à l'aide d'un convoyeur à alimentation par le bas, d'une grue à benne ou d'un chargeur frontal.

Les systèmes de convoyeurs sont conçus pour limiter au minimum le nombre de changements de direction et la hauteur de chute lors de ces changements afin de réduire les renversements et la formation de poussières. Des convoyeurs fermés, sous abri ou ouverts sont employés en fonction du potentiel de formation de poussières ; une extraction et une filtration de poussières sont utilisées si nécessaire. En cas de convoyeurs ouverts, des poussières peuvent être produites si la bande fonctionne trop rapidement (c'est à dire plus de 3,5 m/s). Des racleurs à bande sont employés pour nettoyer la section de retour de la bande afin d'éviter les déversements.

La teneur en humidité du combustible peut être contrôlée pour empêcher la libération de poussières. Des explosions de poussières sont possibles avec les matériaux secs et fins.

Certains tas à ciel ouvert sont traités avec des pulvérisateurs d'eau ou des enduits (tels que de la mélasse, de la chaux ou de l'acétate de polyvinyle) pour éviter la formation de poussières en conditions de vent, de manière à ce que les agents de scellement puissent également éviter l'oxydation.

de surface du combustible. Les matériaux solides peuvent être lavés dans des systèmes d'évacuation et un tassement efficace est souvent utilisé pour éviter les émissions dans l'eau depuis les réserves ouvertes.

Les combustibles solides peuvent être distribués sur site par camion, par convoyeur ou par un système pneumatique à "phase dense". Le stockage journalier ou intermédiaire, généralement dans des silos ou des trémies est fréquemment utilisé. Ces systèmes comprennent généralement un équipement d'extraction et de filtration des poussières.

2.4.1.4 Produits chimiques et gaz de procédé

Les acides, les alcalins et d'autres réactifs chimiques sont souvent utilisés dans le procédé principal, dans l'équipement de dépollution et peuvent être produits pendant le procédé. Ils peuvent être utilisés pour lixivier les métaux, précipiter les composés ou pour les procédés de traitement des gaz ou des effluents. Des composés chimiques peuvent être produits comme partie du procédé principal.

Le fournisseur spécifie généralement le stockage approprié pour ces matériaux. Un grand nombre de ces réactifs peuvent réagir ensemble et les méthodes de stockage et de manutention tiennent généralement compte de ceci en séparant les matériaux réactifs. Les liquides sont généralement stockés en fûts ou en réservoirs dans des zones confinées ouvertes ou fermées, des garnissages résistants aux acides et aux produits chimiques sont utilisés. Les solides sont généralement stockés à l'intérieur en fûts ou en sacs (big bags) avec des systèmes d'évacuation isolés, les silos sont employés pour certains matériaux comme la chaux. Des systèmes de transport pneumatiques sont utilisés.

Les gaz sont utilisés pour différentes finalités dans la production des métaux non-ferreux. Le secteur peut utiliser de grandes quantités de gaz de procédé et l'emploi de gaz particuliers a une influence sur la méthode employée pour le transport et la distribution.

L'oxygène est utilisé pour améliorer la combustion, permettre l'oxydation et améliorer les procédés de conversion et le gaz naturel ou le propane sont employés pour réduire les oxydes métalliques. Le dioxyde de carbone, l'azote et l'argon sont employés pour fournir des atmosphères inertes et pour dégazer le métal fondu. Le chlore est utilisé dans la phase de chloruration de la production de magnésium électrolytique, pour dégazer le métal fondu et pour retirer les composés métalliques indésirables (par ex. magnésium). Le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont utilisés dans les procédés principaux. L'hydrogène et le dioxyde de soufre sont utilisés pour réduire les oxydes et les sels. Le chlore et l'oxygène sont utilisés dans les procédés de lixiviation. Les applications spécifiques sont traitées dans les chapitres spécifiques à la production de chaque métal.

L'exploitant peut produire des gaz sur site bien que l'on rencontre de la production de gaz sous contrat et ces installations fournissent également d'autres sites. Certains sites emploient l'oxygène pour améliorer la combustion et l'azote pour supprimer les étincelles des matériaux pyrophores. Le même procédé modulé en pression ou cryogénique produit ces deux gaz et l'azote produit à faible teneur est approprié pour certaines opérations d'inertage. De la même manière, des gaz de combustion qui ont une faible teneur en oxygène sont employés pour éviter l'auto inflammation.

Les gaz peuvent être transportés par camions-citernes ou par conduites. Le chlore est généralement stocké sous forme liquide dans des fûts ou des réservoirs et il est distribué par une ligne d'évaporation et d'aspiration permettant ainsi d'éviter les fuites de gaz. L'inventaire ainsi que la commande et la surveillance de la pression permettent de détecter les fuites pour tous les gaz.

Une régularisation du débit et une décantation en pression sont utilisés pour mélanger les gaz (par ex. mélanges argon/chlore). Pour les petits volumes, des gaz pré-mélangés peuvent être employés.

La distribution des gaz au sein du site est normalement effectuée par des conduites aériennes avec des systèmes appropriés de protection contre les dommages. La réglementation relative à la santé et à la sécurité régit l'utilisation et la distribution du chlore.

2.4.1.5 Déchets

Les procédés produisent une grande variété de déchets dans ce secteur. Une grande quantité de ces déchets forme la base des matières premières pour d'autres activités du secteur. La section ci-dessus décrivant les matières premières secondaires couvre la plupart des techniques employées. Les chapitres ultérieurs décrivent plus en détails les déchets spécifiques des procédés et leurs techniques de manutention et de stockage.

2.4.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

La consommation de matières premières est fonction du métal produit et ces données figurent dans les chapitres 3 à 12.

Il existe des émissions potentielles de COV dans l'air et de pétrole dans l'eau ou le sol pendant le chargement, le stockage, le déchargement et le transfert de liquides ou de gaz. Il existe des émissions potentielles de COV dans l'air provenant de l'aération du réservoir et des fuites des conduites.

Il existe des émissions potentielles de poussières et de métaux dans l'air et le sol par les opérations de chargement et déchargement, le transfert et le stockage des matériaux solides et la re-suspension des poussières provenant des zones de stockage et des convoyeurs. Des solides en suspension, des métaux, des huiles et différents anions tels que le sulfate (en fonction du minerai et de son traitement) peuvent être émis dans l'eau.

Les émissions provenant de ces sources sont généralement fugitives et difficiles à quantifier. Certaines estimations peuvent être réalisées à partir d'un échantillonnage environnemental tel qu'avec des jauges de dépôts pour les poussières ou des échantillons d'eau de surface. Ce chapitre se concentre par conséquent sur les techniques employées pour éviter les émissions issues de la manutention de matières premières.

2.4.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des techniques permettant de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de bonnes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et du Bureau européen de l'IPPC.

Les techniques appliquées dont il est question ci-dessus sont toutes en mesure d'éviter les rejets dans les milieux environnementaux dans une certaine mesure. Les techniques employées dépendent dans une large mesure du type de matériau utilisé. Par exemple, les éléments lourds et de grande taille sont traités par une palette de techniques totalement différente par rapport aux matériaux fins et poussiéreux. Ces questions sont spécifiques aux sites et matériaux individuels. Il existe toutefois certaines techniques qui sont considérées comme plus efficaces pour éviter les émissions provenant de la manutention des matières premières. Ces techniques sont les suivantes :

- L'utilisation de systèmes de stockage liquide qui sont contenus dans des enceintes étanches capable de contenir au moins le volume du réservoir de stockage le plus grand à l'intérieur de l'enceinte. Différentes lignes directrices existent au sein de chaque Etat membre et il convient de les respecter de façon appropriée. Les zones de stockage doivent être conçues de façon à ce que les fuites provenant de la partie supérieure du réservoir et des systèmes de livraison soient captées et contenues dans l'enceinte. Il faut que le contenu des réservoirs soit affiché et que des alarmes reliées soient utilisées. Il faut considérer l'emploi de livraisons planifiées et de systèmes de contrôle automatiques pour éviter un trop-plein des réservoirs de stockage ;
- L'acide sulfurique et autres matériaux réactifs doivent être stockés dans des réservoirs à double paroi ou des réservoirs placés dans des enceintes chimiquement résistantes de même capacité.

L'utilisation de systèmes de détection des fuites et d'alarmes est judicieuse. S'il existe un risque de contamination des eaux souterraines, la zone de stockage doit être imperméable et résistante au matériau stocké ;

- Les points de livraison doivent être placés à l'intérieur de l'enceinte pour collecter les matériaux déversés. Il est recommandé d'effectuer une ventilation de retour des gaz déplacés vers le véhicule de livraison afin de réduire les émissions de COV. L'utilisation d'une fermeture étanche automatique des raccords servant à la livraison pour éviter les déversements est envisageable ;
- Les matériaux incompatibles (par ex. les matériaux oxydants et les matières organiques) doivent être séparés et des gaz inertes doivent être utilisés pour les réservoirs ou zones de stockage si nécessaire ;
- L'emploi d'intercepteurs d'huile et de solides si nécessaire pour l'évacuation des zones de stockage ouvertes. Le stockage de matériau pouvant libérer de l'huile sur des surfaces cimentées ayant des bordures et d'autres dispositifs de retenue. L'emploi de méthodes de traitement des effluents pour les produits chimiques qui sont stockés ;
- Des convoyeurs de transfert et des conduites placés dans des zones sûres et ouvertes au niveau du sol de façon à ce que les fuites puissent être détectées rapidement et que les dommages provoqués par les véhicules ou par d'autres équipements puissent être évités. Si des conduites enterrées sont utilisées, leur trajet peut être documenté et marqué et des systèmes d'excavation sûrs adoptés ;
- L'emploi de cuves sous pression robustes et bien conçues pour les gaz (dont le GPL) avec une surveillance de la pression des réservoirs et des conduites de distribution pour éviter les ruptures et les fuites. L'utilisation de systèmes de surveillance des gaz dans les zones confinées et à proximité des réservoirs de stockage est nécessaire ;
- Lorsque cela est requis, des systèmes de livraison, de stockage et de récupération étanches peuvent être utilisés pour les matériaux poussiéreux et des silos peuvent être utilisés pour le stockage journalier. Des bâtiments entièrement fermés peuvent être utilisés pour le stockage des matériaux poussiéreux et n'ont pas nécessairement besoin de dispositifs filtrants spéciaux ;
- Des enduits (tels que de la mélasse et du PVA) peuvent être utilisés lorsque cela est approprié et compatible pour réduire la tendance du matériau à former des poussières ;
- Lorsque nécessaire, des convoyeurs fermés avec un équipement d'extraction et de filtration robuste et bien conçu peuvent être utilisés sur les points de livraison, les silos, les systèmes de transfert pneumatique et les points de transfert de convoyeurs pour éviter l'émission de poussières ;
- Les matériaux non poussiéreux et non solubles peuvent être stockés sur des surfaces étanches avec un système d'évacuation et de purge ;
- Les copeaux, les tournures et autres matériaux huileux doivent être stockés avec un couvercle afin d'éviter qu'ils ne soient emportés par l'eau de pluie ;
- Des systèmes de transport rationalisés peuvent être employés pour réduire la formation et le transport de poussières au sein d'un site. L'eau de pluie entraînant les poussières doit être collectée et traitée avant déversement dans le milieu naturel ;
- L'utilisation d'installations de lavage des roues et du châssis ou d'autres systèmes de nettoyage pour nettoyer les véhicules ou manipuler les matériaux poussiéreux. Les conditions locales auront une influence sur la méthode, par exemple, la formation de gel. Des campagnes planifiées pour le balayage des routes peuvent être employées ;
- Des systèmes d'inspection et de contrôle d'inventaire peuvent être adoptés pour éviter les déversements et identifier les fuites ;
- L'échantillonnage de matériaux et les systèmes d'essai peuvent être incorporés dans le système de manutention et de stockage des matériaux pour identifier la qualité des matières premières et

prévoir le mode de fonctionnement du procédé. Il est essentiel que ces systèmes soient conçus et exploités selon les mêmes normes élevées que les systèmes de manutention et de stockage ;

- Les zones de stockage pour les réducteurs comme le charbon, le coke ou les copeaux de bois doivent être surveillées pour détecter les incendies provoqués par l'auto-inflammation ;
- L'utilisation de bonnes pratiques de conception et de construction et une maintenance adéquate.

2.5 Prétraitement et transfert des matières premières

2.5.1 Procédés et techniques appliqués

La forme des minerais, des concentrés et des matières premières secondaires ne permet pas toujours de les utiliser directement dans le procédé principal. Le séchage/la décongélation peuvent être nécessaires pour des questions de contrôle ou de sécurité. La grosseur du matériau peut nécessiter d'être augmentée ou réduite pour favoriser les réactions ou réduire l'oxydation. Des agents réducteurs tels que le charbon ou le coke et des fondants ou d'autres matériaux constituant les laitiers peuvent nécessiter d'être ajoutés pour contrôler le procédé métallurgique. Il peut être nécessaire de retirer des garnissages pour éviter des problèmes au niveau du système de dépollution du procédé et améliorer les vitesses de fusion. Toutes ces techniques sont employées pour produire une charge plus contrôlable et plus fiable pour le procédé principal et sont également employées dans la récupération des métaux précieux pour tester les matières premières de façon à pouvoir calculer les redevances de récupération.

2.5.1.1 Décongélation

La décongélation est réalisée pour permettre aux matériaux congelés d'être manipulés. Elle a lieu par exemple lorsque des minerais, des concentrés ou des combustibles solides fossiles comme le charbon sont déchargés d'un train ou d'un bateau en période hivernale. La décongélation peut être réalisée à l'aide de jets de vapeur afin de simplement fondre la glace et de pouvoir décharger la matière première.

2.5.1.2 Séchage

Les procédés de séchage sont employés pour produire une matière première appropriée pour le procédé principal de production. La présence d'eau est souvent évitée pour différentes raisons :

- Elle est dangereuse lorsque de larges volumes de vapeur sont produits rapidement dans un four très chaud ;
- Elle peut produire une demande de chaleur variable dans un brûleur de concentrés, ce qui perturbe le contrôle du procédé et peut bloquer le fonctionnement auto-thermique ;
- Un séchage séparé à basses températures réduit la consommation en énergie, du fait de l'énergie requise pour surchauffer la vapeur à l'intérieur d'un four de fusion et de l'augmentation significative du volume de gaz global, ce qui augmente la charge du ventilateur ;
- Effets de la corrosion ;
- La vapeur d'eau peut réagir avec le carbone pour former du H_2 et du CO .

Le séchage est généralement réalisé directement en utilisant une chaleur provenant d'un brûleur ou par des jets de vapeur ou indirectement en utilisant de la vapeur ou de l'air chaud dans des serpentins d'échangeurs thermiques. La chaleur générée par les procédés pyrométallurgiques est également souvent utilisée à cet effet ainsi que des effluents gazeux riches en CO qui peuvent être brûlés pour sécher la matière première. Des fours de séchage rotatifs et des sécheurs à lit fluidisé sont employés. Les matières séchées sont en général très poussiéreuses et des systèmes d'extraction et de dépollution sont employés pour capter les gaz poussiéreux. Les poussières collectées sont renvoyées dans le procédé. Les minerais et concentrés séchés peuvent également être pyrophores et la conception du système de dépollution prend généralement ceci en compte, la mise sous azote comme gaz tampon ou le faible taux d'oxygène résiduel présent dans les gaz de combustion peuvent être employés pour supprimer l'inflammation. Les effluents gazeux du système de séchage peuvent contenir du SO_2 et le traitement de ces gaz peut être envisagé.

2.5.1.3 Concassage et réduction de taille

Le concassage et la réduction de taille sont réalisés pour réduire la taille des produits, des déchets ou des matières premières de façon à ce qu'ils soient aptes à la vente ou à un traitement ultérieur. De nombreux types de concasseurs sont utilisés y compris les concasseurs à cônes et à billes. Les matériaux humides ou secs sont concassés et une phase de mélange peut être incluse. L'équipement spécifique employé dépendra des matières premières à traiter. Le concassage par voie sèche est potentiellement une source majeure d'émission de poussières et des systèmes d'extraction et de dépollution sont employés, les poussières collectées sont renvoyées dans les procédés. Les matériaux humides peuvent être concassés lorsque la formation de poussières peut engendrer des problèmes et lorsque des phases de granulation par voie humide vont suivre.

La granulation est utilisée pour produire des petites particules de laitier qui sont appropriées comme matériau de grenailage, de comblement de route ou de matériau pouvant être retraité pour récupérer le contenu en métal. Le laitier fondu est coulé dans un bain d'eau ou versé à travers un flux d'eau. La granulation est également employée pour produire des grenailles. Les procédés de granulation forment potentiellement des poussières fines et des aérosols qui doivent être contrôlés.

Les composants électroniques sont constitués de différents métaux non-ferreux et ceux-ci peuvent être concassés dans des broyeurs ou des unités pour libérer les cartes de circuits et autres matériaux des composants métalliques de façon à pouvoir réaliser la séparation.

2.5.1.4 Cassage de batterie

Le cassage de batterie est utilisé pour récupérer le plomb, le nickel, le cadmium et d'autres matériaux provenant des batteries. Pour les batteries au plomb et à l'acide, des broyeurs à marteau sont employés pour casser les gaines des batteries afin de libérer le plomb (sous forme de plaques) ou des composés de plomb (sous forme de pâte) et pouvoir récupérer le matériau constituant la gaine plastique (principalement du polypropylène), l'électrolyte est également retirée et traitée ou utilisée. Un concassage en deux phases peut être utilisé pour contrôler la grosseur des particules et éviter que l'oxyde de plomb ne soit enfoncé dans le plastique pendant une phase unique. Le matériau plastique est séparé et lavé pour améliorer la qualité et produire du plastique approprié pour le recyclage. L'acide contenu dans les batteries peut contaminer le sol et l'eau s'il n'est pas collecté et manipulé correctement, des systèmes d'évacuation étanches et résistants aux acides peuvent être utilisés avec des réservoirs de collecte et de stockage dédiés. Les phases de broyage peuvent produire un brouillard acide qui peut être collecté par des laveurs humides ou des filtres de brouillard.

Les batteries au Ni/Cd sont pyrolysées pour retirer tout revêtement en plastique et les ouvrir. La pyrolyse est effectuée à basse température et les gaz sont traités par une post-combustion puis dans un filtre à manches. Le cadmium et le nickel sont récupérés des électrodes et l'acier est récupéré du matériau constituant le coffrage.

2.5.1.5 Mélange

Le mélange est réalisé pour mélanger des minerais ou des concentrés de qualités différentes et pour combiner des fondants ou des réducteurs, si nécessaire, avec le minerai afin de produire une charge d'alimentation stable vers le procédé principal. Le mélange peut être obtenu dans un équipement de mélange breveté, durant la phase de broyage ou durant les phases de transport, de séchage et de stockage. Des mélanges précis sont produits à l'aide de systèmes de stockage à perte de poids, de balances à bande ou par le volume de l'équipement de chargement. Le mélange peut être une opération très poussiéreuse et des niveaux élevés de confinement et d'extraction sont appliqués. Les poussières collectées sont renvoyées dans les procédés. Le mélange par voie humide est également utilisé pour éviter la production de poussières ; une boue est alors produite qui est ensuite déshydratée et utilisée dans un procédé de granulation. Des agents de revêtement et des liants peuvent également être utilisés à cet effet. En fonction du procédé, le matériau mélangé peut nécessiter d'être granulé avant d'être utilisé dans un autre procédé comme le frittage.

2.5.1.6 Briquetage, granulation et autres méthodes d'agglomération

De nombreuses techniques sont employées pour traiter les concentrés, les poussières de gaz et autres matières secondaires et elles comprennent le paquetage de câbles ou de petits déchets, la compression de briquettes de matériau comme mentionné plus haut et l'extrusion ou le laminage de pâtes pour produire des billes de matériau de même taille. Des agents de revêtement et des liants sont utilisés à cet effet pour réduire les émissions de poussières au cours des phases de procédé ultérieures.

Des briquettes et des granulés contenant un mélange de minerai ou de concentré fin, de poussières recyclées et de matériau supplémentaire tels que des réducteurs, sont souvent produits pour garantir des conditions de fusion efficaces. Après ajout de liants ou d'eau, le mélange est alimenté dans une presse qui produit souvent des briquettes en forme de petits coussins ou est granulé dans un fût à granulation rotatif ou un disque de granulation. Le liant doit avoir des propriétés permettant que les briquettes aient une solidité suffisante pour être manipulées facilement et pour ne pas se casser lorsqu'elles sont chargées dans le four.

Différents types de liants peuvent être utilisés, tels que la mélasse et la chaux, le silicate de sodium, le laitier d'acier ou le ciment et ils réduisent également la formation de poussières. Du brai peut également être ajouté pour augmenter la solidité. Les gros fragments de poussières sous filtre provenant du filtre à manches du four et provenant des opérations de concassage et de tamisage peuvent être mélangés avec les autres matériaux pour être mis en briques.

2.5.1.7 Frittage et calcination

Ces procédés sont utilisés pour augmenter la grosseur de la matière première ou la composition chimique de façon à ce qu'elle soit appropriée pour un procédé ultérieur. L'agglomération et le frittage permettent d'obtenir un flux de gaz plus régulier à travers le lit du four et de réduire la formation de poussières, le volume du gaz et les émissions fugitives [tm 109, UNEP 1993].

Le frittage et la calcination sont également employés à cet effet et ils sont en outre utilisés pour ajuster la forme chimique du mélange ou pour convertir le soufre présent par ex. la calcination de la dolomite en chaux dolomitique dans la production de magnésium. Le principal mécanisme de liaison dans le frittage du minerai est obtenu en amenant le minerai à une température où les minéraux de gangue commencent à fondre et où des particules individuelles sont alors fusionnées ensemble dans une matrice de laitier fondu. Dans certains cas, la recristallisation, par ex. la formation de nouveaux cristaux à travers les anciennes interfaces du grain va jouer un certain rôle dans le procédé de frittage. L'aggloméré est généralement concassé et classé et les matériaux fins sont renvoyés dans le procédé de frittage, parfois le matériau retourné est 2 à 4 fois plus grand que l'aggloméré produit. Les particules pour la charge sont alors envoyées au four de fusion.

Le frittage et le grillage des minerais sulfurés sont souvent réalisés ensemble à hautes températures et dans ce cas, les gaz produits ont une teneur élevée en dioxyde de soufre. L'oxydation du soufre produit la chaleur nécessaire pour le procédé. Généralement, le minerai est mélangé avec l'aggloméré retourné et les fondants et peut être granulé avant frittage. Du coke est également ajouté dans le cas des oxydes.

Les installations d'agglomération utilisent une grille mobile, une grille continue ou une bande d'acier pour transporter les matériaux à travers les zones de chauffage et de refroidissement, certaines installations emploient des plateaux en acier pour contenir la charge. Les gaz sont tirés vers le haut ou vers le bas à travers le lit (frittage à flammes directes ou à vide). Une machine de frittage utilisant une combinaison de phases à flammes directes et à vide est également utilisée et peut réduire au minimum les volumes de gaz et les émissions fugitives et récupérer la chaleur de manière efficace. Parfois, une couche de matériau fritté est placée entre la grille et le mélange est utilisé pour protéger la grille d'acier.

Le frittage de minerais sulfurés est exothermique, d'autres matériaux emploient le gaz naturel comme combustible. Les gaz chauds sont généralement recyclés pour préchauffer le lit ou l'air de combustion. L'aggloméré est refroidi par de l'air soufflé sur le lit ou par une trempe à l'eau. L'aggloméré est

ensuite tamisé et parfois concassé pour produire un matériau de charge final à granulométrie régulière. Les matériaux fins sont renvoyés dans le procédé de frittage.

La calcination est réalisée dans des fours rotatifs, à lit fluidisé ou à soles multiples, il n'y a normalement aucun ajout de carbone durant le procédé. La calcination de concentrés sulfurés effectue la phase de grillage et est traitée dans les chapitres relatifs à la production des métaux.

2.5.1.8 Procédés de vaporisation

Ces procédés sont employés pour produire des vapeurs de métaux volatiles tels que le plomb ou le zinc, à partir d'un substrat. Le procédé utilise des hautes températures et une source de carbone pour produire un laitier inerte par vaporisation ou volatilisation des métaux du matériau. Cela permet de récupérer les métaux habituellement sous forme d'oxyde pour une transformation ultérieure. Des fours Waelz et des fours vaporisant les laitiers sont employés. La vaporisation est également obtenue durant les procédés de convertissage batch lorsque des métaux volatiles sont retirés durant le procédé.

2.5.1.9 Élimination de revêtement et déshuilage

Ces opérations sont généralement réalisées sur des matières premières secondaires pour réduire la teneur en matières organiques de la charge de certains procédés. Les procédés de lavage et de pyrolyse sont utilisés. La force centrifuge permet de récupérer l'huile et de réduire la charge sur le système thermique. Des variations importantes dans la teneur en matières organiques peuvent provoquer une combustion inefficace dans certains fours et générer des volumes élevés de gaz de combustion qui contiennent des composés organiques résiduels. La présence de revêtements peut également réduire significativement la vitesse de fusion [tm 121, Hoogovens 1998, tm 125, ETSU 1994]. Ces événements peuvent provoquer des émissions très importantes de fumées, de dioxines et de poussières métalliques dans l'air à moins que les systèmes de collecte des gaz et de combustion ne soient suffisamment robustes. Des étincelles ou des particules de combustion peuvent être produites pouvant provoquer des dégâts importants sur l'équipement de dépollution. L'élimination dans le four du revêtement des déchets contaminés est aussi moins efficace dans la plupart des cas que l'élimination du revêtement des matériaux broyés dans un four séparé en raison de la production de plus de scories [tm 125, ETSU 1994] mais certains fours sont spécialement conçus pour recevoir des contaminants organiques.

L'élimination de l'huile et de certains revêtements est réalisé dans un four spécialement conçu tel qu'un sécheur à copeaux. Dans la plupart des cas, on utilise un four rotatif à basse température pour volatiliser l'huile et l'eau. Un chauffage direct et indirect du matériau est utilisé. Une unité de post-combustion fonctionnant à haute température (supérieure à 850 °C) est utilisée pour détruire les produits organiques produits dans le four et les gaz sont généralement filtrés dans un filtre à manches.

Un stripping mécanique est également fréquemment utilisé pour retirer l'isolation des câbles et les revêtements des autres matériaux. Certains procédés emploient des techniques cryogéniques pour fragiliser le revêtement et pour qu'il soit ainsi plus facile à retirer. Le lavage avec des solvants (parfois chlorés) ou avec des détergents peut également être réalisé. Les systèmes à vapeur de solvant avec condenseurs intégrés sont les plus courants. Ces procédés sont également employés pour dégraisser les éléments de la production. Des systèmes de traitement pour éviter la contamination des eaux sont employés dans ces cas.

2.5.1.10 Incinération et pyrolyse

Ces deux procédés sont normalement employés pour traiter les films photographiques, les balayures, les catalyseurs et autres matériaux pour concentrer la teneur en métaux précieux ou pour récupérer le nickel. Ils sont également employés pour prétraiter les catalyseurs afin de retirer le contenu organique avant un traitement ultérieur. Ces procédés sont généralement réalisés à basse température pour éviter l'entraînement des métaux. Les gaz produits par l'incinérateur sont alors traités dans une unité de post-

combustion et un filtre à manches. La formation potentielle de dioxines doit être prise en compte pour ces procédés.

Des fours à armoire simple et des fours rotatifs sont employés pour la phase d'incinération ou de pyrolyse. Les matières premières sont alimentées en plateaux dans les fours de séchage à armoire. Les cendres riches en métaux sont collectées et trempées avant d'être transformées ultérieurement.

2.5.1.11 Procédures de lixiviation

La lixiviation ou la pré-lixiviation est utilisée pour retirer les impuretés tels que les alcalins et les alcalino-terreux, le magnésium, le sulfate ou le chlorure de certains concentrés et matières premières secondaires avant les procédés ultérieurs. La lixiviation est également utilisée pour réduire la teneur en cadmium, en chlorure et en sulfate etc. dans les déchets ou pour les récupérer comme sous-produits. Les exemples sont les suivants - l'oxyde de Waelz peut être lavé pour produire un matériau approprié pour une utilisation dans un procédé primaire ; - le cadmium présent dans les poussières sous filtre peut être retiré avant de recycler les poussières dans un four de fusion. La pré-lixiviation est également employée pour retirer les métaux des matrices complexes ou pour concentrer les métaux précieux utilisés pour revêtir les catalyseurs. Les minerais tels que le quartz sont lavés et tamisés avant utilisation. Des procédés de lavage en circuit ouvert ou fermé sont employés, une purge de solution est employée dans un système en circuit fermé. Les eaux usées sont traitées avant rejet.

2.5.1.12 Techniques de séparation

Ces procédés sont employés pour retirer les impuretés des matières premières avant leur utilisation. Les techniques de séparation pour les minerais et concentrés (telle que la flottation) sont généralement utilisées à la mine lorsque le matériau est concentré ou « avantagé », mais ces techniques sont également employées en différents sites de production pour traiter le laitier afin de retirer les fragments riches en métaux. La séparation magnétique est utilisée pour retirer des éléments ferreux.

Les techniques de séparation sont utilisées plus fréquemment pour les matières premières secondaires et la plus courante est la séparation magnétique. La séparation par milieu lourd et densité (nage/plonge) est utilisée dans le secteur du traitement des déchets mais on peut la rencontrer dans le secteur des métaux non-ferreux, par exemple dans le traitement des déchets de batteries pour retirer les matières plastiques. Dans ce cas, la différence de densité et de grosseur des différents fragments est utilisée pour séparer les métaux, les oxydes métalliques et les composants plastiques en utilisant un support aqueux. La classification pneumatique est également utilisée pour séparer les métaux de matériaux moins denses tels que le plastique et les fibres des déchets électroniques. La flottation est également employée pour lixivier les déchets.

La séparation magnétique est employée pour retirer des morceaux de fer pour réduire la contamination des alliages. Généralement, des aimants overband sont employés au-dessus des convoyeurs. Des soles inclinées sont utilisées dans un four réverbère pour fondre le zinc, le plomb et l'aluminium pour laisser des impuretés importantes à point de fusion supérieur (par ex. le fer) sur la sole pour un traitement ultérieur.

Des champs électromagnétiques mobiles (séparation par courant de Foucault) sont utilisés pour séparer l'aluminium des autres matériaux. Une variante de cette technique consiste à utiliser ce champ électromagnétique mobile pour pomper l'aluminium fondu ou d'autres métaux sans contact direct entre le métal et les composants mécaniques.

D'autres techniques de séparation comprennent l'utilisation de couleurs, d'UV, de rayons infrarouges, des rayons X, de lasers et d'autres systèmes de détection en combinaison avec des trieurs mécaniques ou pneumatiques. Ils sont employés par exemple pour séparer les batteries au Ni/Cd d'autres types de batteries et des techniques sont en cours de développement pour d'autres applications.

2.5.1.13 Systèmes de transfert et de chargement

Ces systèmes sont utilisés pour transporter les matières premières des phases de prétraitement vers dans le procédé principal. Des techniques similaires à celles utilisées pour les matières premières sont employées et des problèmes similaires de production de poussières, de confinement et d'extraction existent. Les matériaux collectés sont réutilisés.

Les matériaux prétraités peuvent être plus secs que les matières premières et des méthodes plus rigoureuses sont employées pour éviter les émissions de poussières, les systèmes de vaporisation d'eau ne sont généralement pas utilisés mais des normes élevées d'entretien des locaux sont nécessaires. Les convoyeurs pour le transport des matériaux formant des poussières sont généralement fermés et dans ces cas, des systèmes d'extraction et de dépollution efficaces sont employés dans les zones sensibles et exposées comme les points d'échange des convoyeurs. Une alternative consiste à utiliser des jets d'eau fins ou des brouillards d'eau. Des racleurs de fond sont utilisés sur les convoyeurs pour éviter le transport de matériau dans la section de retour de la bande. Des systèmes de convoyage à phase dense et pneumatique sont également fréquemment utilisés.

2.5.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les émissions potentielles vers tous les milieux environnementaux sont similaires à celles de la manutention des matières premières. En outre, des fumées, des gaz acides, des vapeurs et des poussières provenant des procédés thermiques sont libérés dans l'air ainsi que des poussières provenant des procédés mécaniques, enfin des métaux provenant des systèmes de granulation et de filtrage sont libérés dans l'eau. Les émissions provenant de ces procédés sont généralement collectées.

2.5.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des techniques permettant de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de bonnes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et sur l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC.

Les techniques employées dépendent dans une large mesure du type de matériau utilisé. Par exemple, les éléments de grande taille et lourds sont traités avec une gamme totalement différente de techniques par rapport aux matériaux fins et poussiéreux. Ces questions sont spécifiques aux sites et matériaux individuels. Les opérations de prétraitement et de transfert traitent souvent des matériaux qui sont secs ou risquent de produire des émissions de procédé vers n'importe quel milieu environnemental. Une conception plus détaillée de l'équipement de procédé à ce stade est par conséquent nécessaire et les procédés doivent être contrôlés et surveillés efficacement. La nature du matériau (par ex. formant des poussières, pyrophore) doit être prise en compte et les émissions potentielles de COV et de dioxines dans les procédés thermiques doivent être évaluées. Les systèmes d'extraction et de dépollution doivent notamment être conçus, construits et maintenus soigneusement. L'analyse des techniques appliquées dans cette section inclut les problèmes qui seront rencontrés dans les différentes options de procédés. Il convient également de se référer aux techniques listées pour la manutention des matières premières. Les éléments suivants doivent toutefois être considérés comme les plus importants.

- Utilisation de procédés de prétraitement et de transfert avec un équipement d'extraction et de dépollution résistant bien conçu pour éviter les émissions de poussières et d'autres matériaux. La conception de cet équipement doit tenir compte de la nature des émissions, du taux maximal des émissions et de toutes les sources potentielles.
- Utilisation de systèmes de convoyage fermés pour les matériaux poussiéreux. Ces systèmes doivent être munis d'un équipement d'extraction et de dépollution lorsque des émissions de poussières sont possibles.

- Procédés qui « coulent » directement dans le procédé suivant si possible pour réduire au minimum la manutention et conserver l'énergie thermique.
- Utilisation de systèmes de broyage, de mélange et de granulation par voie humide si d'autres techniques de contrôle des poussières sont impossibles ou inappropriées.
- Systèmes de nettoyage thermique et de pyrolyse (par ex. séchage de copeaux et élimination du revêtement) utilisant un équipement de post-combustion résistant pour détruire les produits de la combustion par ex. les COV et les dioxines. Il faut que les gaz soient maintenus à une température supérieure à 850 °C (1100 °C si présence de plus de 1% de matière organique halogénée), en présence d'au moins 6% d'oxygène pendant 2 secondes minimum. Des temps de séjour inférieurs peuvent aussi bien provoquer la destruction complète des COV et dioxines mais il convient de le démontrer au niveau local. Les gaz doivent être rapidement refroidis pour limiter le temps de séjour dans la fenêtre de température de reformation de dioxines.
- Pour réduire l'impact des COV, il est nécessaire que les procédés de lavage pour retirer l'huile ou les contaminants emploient des solvants légers. Il convient d'utiliser des systèmes efficaces de récupération des solvants et de l'vapeur.
- Procédés de frittage à flammes directes à convoyeur en acier totalement fermés ou à convoyeur en acier et à vide doivent être considérés. Le frittage à convoyeur en acier comporte plusieurs avantages pour certains groupes de métaux et permet de réduire au minimum les volumes de gaz, réduire les émissions fugitives et récupérer la chaleur. Ils seront traités ultérieurement. Les systèmes d'extraction doivent empêcher les émissions fugitives.
- Utilisation de fours rotatifs avec trempe humide de cendres pour les procédés impliquant la réduction de volume de matériaux tels que les films photographiques. Des installations plus petites peuvent employer un four à grille mobile. Dans les deux cas, le gaz de combustion doit être traité pour retirer les poussières et les gaz acides le cas échéant.
- Si nécessaire pour réduire au minimum la génération de fumées et de vapeurs et pour améliorer les vitesses de fusion, il convient de concevoir des procédés de séparation pour produire des matériaux propres qui sont appropriés pour les procédés de récupération.
- Collecte et traitement des effluents liquides avant rejet du procédé pour retirer les métaux non-ferreux et autres composés.
- Utilisation de bonnes pratiques de conception et de construction et une maintenance adéquate.

Méthode de prétraitement	Matériaux	Groupe de métaux	Commentaires
Séchage	Concentrés & fondants	Tous	Alimentation par voie sèche vers un four de fusion
Concassage	Laitier	Tous	Mécanique ou à base d'eau
	Batteries		Mécanique 1 ou 2 phases. Emissions potentielles d'acide vers tous les milieux.
Mélange	Concentrés & fondants	Tous	Utilisation de phases de convoyage et de mélange
Agglomération	Concentrés & fondants Résidus	Tous (rarement Cu & Ni)	Application de revêtement et granulation
Frittage	Concentrés & fondants	Pb, Zn, Ferroalliages	émissions de SO ₂ et poussières
Vaporisation	Poussières sous filtre, laitiers	Pb, Zn	Les poussières sous filtre provenant de différents procédés contiennent du Pb et du Zn
Elimination de revêtement, Déshuilage	Câble Copeaux La force centrifuge permet de récupérer l'huile et de réduire la charge sur le système thermique.	Cu, Al, Ti etc.	Émissions de COV et de dioxines provenant des systèmes thermiques. Des systèmes mécaniques et cryogéniques sont disponibles
Incinération	Film, catalyseurs.	Métaux précieux.	Émissions de COV et de dioxines
Lixiviation	Matières premières Résidus	Pb, Zn, MP	
Séparation	Matériau plastique Métaux	Pb, Cd, MP, Al	Systèmes pneumatiques ou liquides
Dégraissage	Produits – utilisation de solvants ou de systèmes à base aqueuse.	Cu etc.	Potentiel pour les hydrocarbures chlorés

Tableau 2.3 : Résumé des méthodes de prétraitement

2.6 Production du métal et techniques de régulation des procédés

Métal	Types de fours susceptibles d'être rencontrés	Commentaires
Cuivre	Fours de fusion flash. Fours de fusion à bain. Fours électriques. Fours rotatifs ou convertisseurs Hauts fourneaux. Fours à cuve. Fours à induction. Fours Réverbères.	<ul style="list-style-type: none"> Différentes applications en fonction de la matière première et de la phase de procédé.
Aluminium	Cellules d'électrolyte fondues. Fours Réverbères. Fours à cuve et rotatifs. Fours à induction.	<ul style="list-style-type: none"> Cellules d'électrolyte fondu uniquement pour les matières premières
Plomb	Haut Fourneau Imperial (ISF). Four flash (Kivcet). Four à bain (QSL, ISA Smelt/Ausmelt). Fours rotatifs courts Cuve chauffée Machine de frittage	
Zinc	ISF et Distillation New Jersey. Four à lit fluidisé, machine de frittage. Four à induction et à creuset. Four de vaporisation du laitier.	<ul style="list-style-type: none"> Le contrôle de la température de fusion est essentiel.
Métaux Précieux	Four électrique. Haut fourneau. Four à creuset. Incinérateur statique et rotatif. Coupole et BBOC. Distillation par le vide	<ul style="list-style-type: none"> Différentes applications en fonction de la matière première et de la phase du procédé.
Mercure	Four de séchage rotatif. Four à tube. Four à soles étagées.	
Métaux réfractaires	Four à poussoir. Four à bande. Four batch. Four rotatif. Four à bombardement électronique. Four à induction par le vide.	<ul style="list-style-type: none"> Les fours à poussoir, à bande, batch et rotatifs sont employés pour la production de poudre. Le four à bombardement électronique est utilisé pour la fusion de lingots
Alliages	Haut fourneau. Four à arc électrique, Four électrique Creusets à réaction. Four à soles étagées. Réacteurs métallo-thermiques.	<ul style="list-style-type: none"> Le four à arc électrique est utilisé comme four ouvert, semi-fermé et fermé. Le four à soles étagées est employé uniquement pour le grillage du Mo.
Métaux Alcalins	Cellules d'électrolyte fondu. Fours électriques, Fours à induction.	<ul style="list-style-type: none"> Les fours à induction sont principalement employés pour la re-fusion.
Nickel et Cobalt	Fours de fusion instantanée. Fours de fusion à bain. Fours électriques, Fours Réverbères. Convertisseurs. Fours de séchage et fours rotatifs. Fours à induction	<ul style="list-style-type: none"> Différentes applications en fonction de la matière première et de la phase de procédé.
Carbone et Graphite	Fours à cuve, Four à vide. Fours électriques.	

Tableau 2.4 : Applications types des fours

Il existe plusieurs procédés ou combinaisons de procédés pour produire et fondre les métaux. Les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques sont montrés ci-dessous. Leur ordre d'apparition n'est pas important et ne reflète aucun classement. Les techniques décrites dans les chapitres spécifiques aux métaux fournissent plus de détails sur les procédés pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques, les métaux qu'ils produisent et les avantages et inconvénients spécifiques à ces applications.

Les fours sont employés pour de nombreux objectifs dans ce secteur tel que le grillage ou la calcination des matières premières, la fonte et l'affinage et pour la fusion des minerais et concentrés.

Le même « type » de four ou de procédé peut être utilisé pour différents objectifs et ce panorama est par conséquent destiné à fournir une vue générale des différentes applications [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 35, LRTAP 1995].

Un aspect important dans le choix du procédé est la relation avec la collecte des fumées et des gaz ; on rencontre des procédés étanches, semi-fermés et ouverts. La conception du système de collecte des fumées est fortement influencée par la géométrie qui peut rendre la collecte des fumées difficile dans certains cas. L'utilisation de systèmes de transfert nécessitant de déplacer les hottes de captage d'un four est une illustration de ce facteur. L'autre facteur important de l'applicabilité d'un type de procédé particulier est le type et la variabilité de la matière première utilisée, certains procédés permettent d'utiliser toute une gamme de matériaux mais certains nécessitent un type précis de matériau. Ces questions sont traitées ultérieurement dans les chapitres relatifs à la production des métaux individuels, dans les techniques à prendre en compte pour définir les meilleures techniques disponibles. De la même manière, le fonctionnement et la maintenance de ces systèmes sont également essentiels.

2.6.1 Fours de grillage, calcination, etc.

2.6.1.1 Fours rotatifs

Les fours rotatifs utilisent le même aménagement que les fours tournants mais fonctionnent sans fondre la charge.

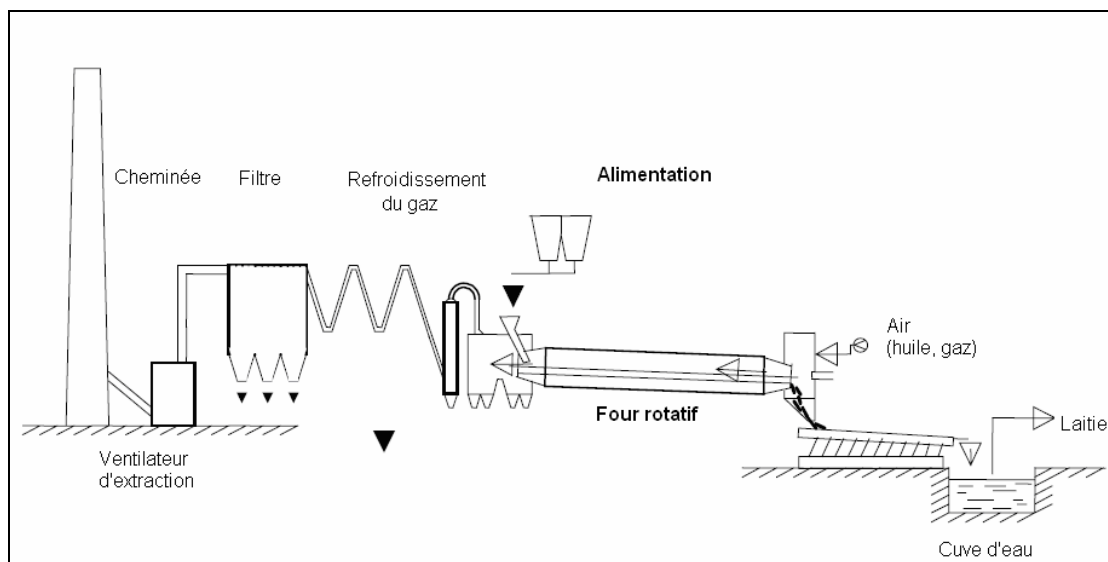


Figure 2.1: Four rotatif

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Ces fours rotatifs sont employés dans une grande variété de procédés de vaporisation et de calcination. Les principaux exemples sont la production d'oxyde de zinc par vaporisation dans un four Waelz ; la production de calcine dans le procédé de production de ferronickel ; la calcination de l'hydroxyde

d'aluminium et la calcination de l'hydroxyde de magnésium en un oxyde de magnésium légèrement brûlé pour la production de magnésium électrolytique. D'autres applications sont le prétraitement de différentes matières premières à hautes températures, l'incinération de film et de papier photographique et le séchage de concentrés et de mélanges de matériaux à basse température.

2.6.1.2 Four à lit fluidisé

Ces fours sont particulièrement adaptés lorsqu'un bon contrôle de la température est exigé, par exemple pour le grillage sulfatant et la surcuisson de concentrés de zinc ainsi que pour la calcination du Al_2O_3 .

L'air de combustion est soufflé à travers des tuyères dans une grille sur le fond du four et à travers le lit fluidisé constitué de matériaux en cours de cuisson sur la grille. Le concentré est chargé sur le dessus du lit. L'oxygène réagit avec les sulfures dans le lit pour produire des oxydes, la calcine. Du gaz SO_2 est formé à environ 900 à 1000 °C par l'oxydation du sulfure pour former de l'oxyde. A cette température, près de la totalité du fer se combine avec les oxydes de métaux lourds pour produire de la ferrite en présence d'oxygène en excès.

Une partie de la calcine est retirée mécaniquement du four mais une partie est transportée dans le flux gazeux et est retirée au niveau d'une chaudière de récupération et par un électrofiltre. Le grillage élimine quelques impuretés mineures comme le Cl, le F, le Se et l'Hg vers la phase gazeuse.

La chaleur produite pendant le grillage est récupérée sous forme de vapeur par des serpentins de refroidissement dans la chaudière de récupération. L'utilisation de la vapeur peut varier quelque peu en fonction des besoins de l'installation mais une partie est toujours utilisée pour le chauffage dans le procédé.

2.6.1.3 Four à soles étagées

Ce four est constitué d'une tour contenant 8 à 12 soles en brique réfractaire de forme annulaire placées verticalement et fermées dans une coque d'acier cylindrique à garnissage réfractaire. La charge du four est généralement réalisée à l'extérieur de la sole supérieure et le matériau est déplacé vers le centre de cette sole par des râtaux où il tombe au centre de la seconde sole. Le flux de matériau sur la seconde sole s'effectue depuis le centre d'où il tombe à l'extérieur de la troisième sole. Cet écoulement en zigzag est répété jusqu'à ce que le matériau grillé soit rejeté. Les râtaux sont fixés à un tube central, vertical et rotatif refroidi par air. Des brûleurs utilisant du gaz ou du fuel sont disposés en différents points dans le four en fonction des caractéristiques de combustion du matériau. L'air de refroidissement utilisé pour contrôler le tube central est normalement employé comme air de combustion pour le préchauffage du four.

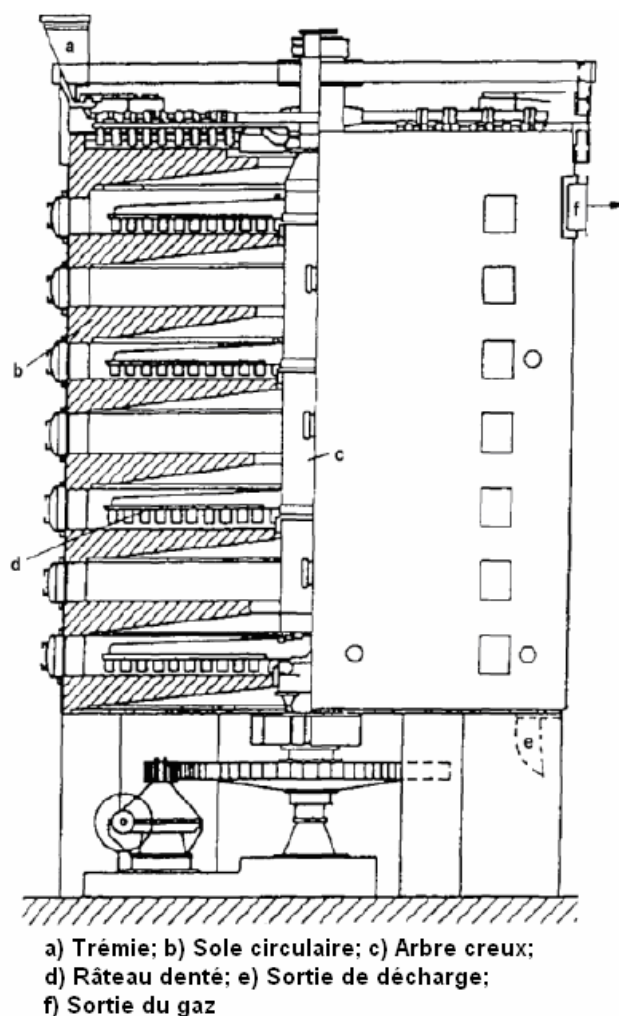


Figure 2.2: Four à soles étagées

Ce four est utilisé pour griller des minerais sulfurés, pour produire du métal directement dans le cas du mercure ou d'un oxyde tel que l'oxyde de molybdène. Le rhénium vapeur libéré par le procédé de grillage de la molybdénite peut être récupéré des effluents gazeux du four de grillage en utilisant un laveur humide avec une installation ultérieure de récupération du rhénium. Le four à soles étagées est également employé pour régénérer le charbon actif.

2.6.1.4 Fours de frittage

Les matières premières pour l'installation de frittage sont les concentrés, les fines de minerais, les poussières de gaz et autres matières secondaires. Dans l'installation de frittage, le matériau est d'abord aggloméré comme requis et peut être granulé. Le matériau aggloméré est alimenté dans le four de frittage en une couche ou sur glissières, les gaz chauffés sont aspirés (tirage) ou soufflés (vide) à travers le lit.

Dans la machine de frittage à convoyeur en acier, un four à multi-compartiments est employé à travers lequel l'aggloméré vert est transporté sur une bande de convoyeur en acier et perforée. L'aggloméré est séché dans le compartiment de séchage par le gaz circulant depuis le dernier compartiment de refroidissement. Dans le compartiment de préchauffage, la température de l'aggloméré augmente de façon à ce que le matériau soit calciné et le carbone prenne feu dans le lit. Le gaz de chauffage est prélevé du second compartiment de refroidissement. Dans le compartiment de frittage, la température de frittage est atteinte. Le gaz de chauffage, en plus de l'énergie fournie par le brûlage du carbone et l'oxydation du fer, est prélevé du premier compartiment de refroidissement.

Les compartiments avant sont aspirés par le vide, l'air de refroidissement vers les trois compartiments de refroidissement est soufflé à travers le lit. Si de l'énergie supplémentaire est requise pour contrôler le profil de température dans les compartiments, du gaz CO issu du procédé de fusion ou du gaz naturel est brûlé dans les compartiments de préchauffage et de frittage. Une partie de l'aggloméré ou des granulés produits sont utilisés comme couche de fond sur la bande d'acier pour la protéger des températures trop élevées. Les gaz d'échappement sont traités dans des épurateurs à cascade et/ou des filtres à manches. Les poussières sont recyclées vers l'agglomération

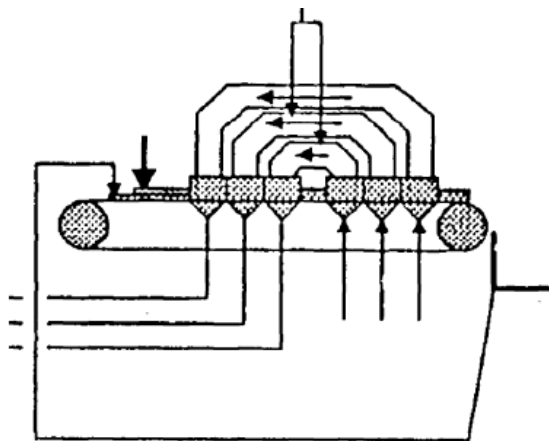


Figure 2.3: Four de frittage à convoyeur en acier

Les fours de frittage sont utilisés pour le frittage de différents minerais, poussières et boues. Les fours de frittage à convoyeur en acier sont employés pour les granulés de chromite, le minerai de manganèse et les concentrés de niobium, mais peuvent avoir d'autres applications.

2.6.2 Fours de fusion

2.6.2.1 Four réverbère

Le four réverbère est utilisé pour la fusion des concentrés et des matières secondaires. Il en existe généralement deux types : un four à bain unique pour la fusion de la calcine ou de concentrés et un four à sole réverbère pour la fusion ou l'affinage. Les fours peuvent parfois être basculés pour verser ou souffler le métal. Des tuyères peuvent être utilisées pour l'injection des gaz de traitement ou pour ajouter des matériaux fins.

Le four est construit selon un certain nombre de configurations en fonction des métaux et applications spécifiques, les variantes comprennent des soles inclinées et des puits latéraux pour des objectifs de fusion spécifiques, des tuyères et des lances pour ajouter des gaz.

Le laitier est généralement retiré par coulée.

Lorsque des minerais sulfurés sont fondus dans un four réverbère, les concentrations de dioxyde de soufre sont normalement basses en raison du volume élevé de gaz de combustion et de la vitesse lente d'élimination du soufre dans le four.

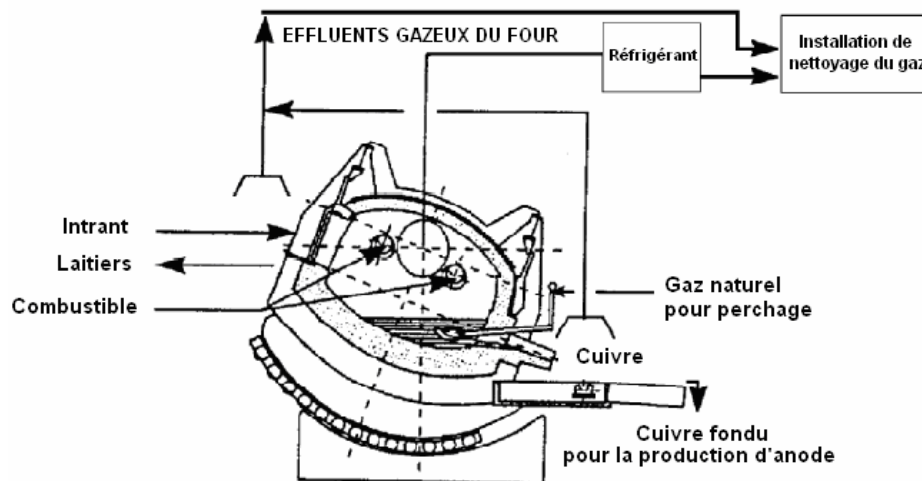


Figure 2.4: Exemple de four incliné à sole réverbère utilisé pour les matières secondaires
[tm 124, DFIU Cu 1999; tm 226, VDI 2102 1999]

Ces fours sont employés pour fondre différentes matières premières et matières secondaires et pour l'affinage thermique.

2.6.2.2 Haut fourneau (et haut fourneau Imperial - ISF)

Il s'agit d'un type de four à cuve. Il utilise de l'air chauffé soufflé par des tuyères dans la partie basse du four pour brûler le coke qui est mélangé à la charge du four constituée d'oxyde métallique ou de matière secondaire et de fondants, les matériaux sont souvent mis en briques avant la charge. La combustion d'une partie du coke augmente la température du four et ce qui reste produit du CO qui avec l'hydrogène produit par la réaction eau-gaz réduit les oxydes métalliques en métal. La réaction produit un gaz riche en monoxyde de carbone. Celui-ci peut être capté et traité puis brûlé pour préchauffer l'air soufflé ou peut être brûlé entièrement dans une unité de post-combustion ou dans une partie du four riche en oxygénée. Dans certains cas, les matières premières telles que les poussières d'oxyde de zinc sont chargées via les tuyères.

Le métal est collecté sur une sole ou un creuset au fond du four et peut être coulé en continu ou en discontinu. S'il est coulé en discontinu, le laitier flotte sur le dessus du métal et le métal est coulé à partir d'un trou de coulée séparé. L'extraction et la dépollution des fumées sont réalisées durant le procédé de coulée.

La chemise du four est normalement refroidie à l'eau soit sur toute sa hauteur ou dans la partie inférieure, le haut fourneau est également appelé four à double enveloppe refroidi à l'eau (water jacket). Il existe deux variantes de haut fourneau en fonction de la méthode d'alimentation de la charge et de la température de fonctionnement utilisée pour fondre le métal. Les fours peuvent être : - a) à « voûte chaude » où la charge est alimentée par une « cloche » ou un convoyeur via une écluse de transfert ou b) à « voûte froide » où le four est chargé depuis une trémie et la charge fait office elle-même d'étanchéité supérieure.

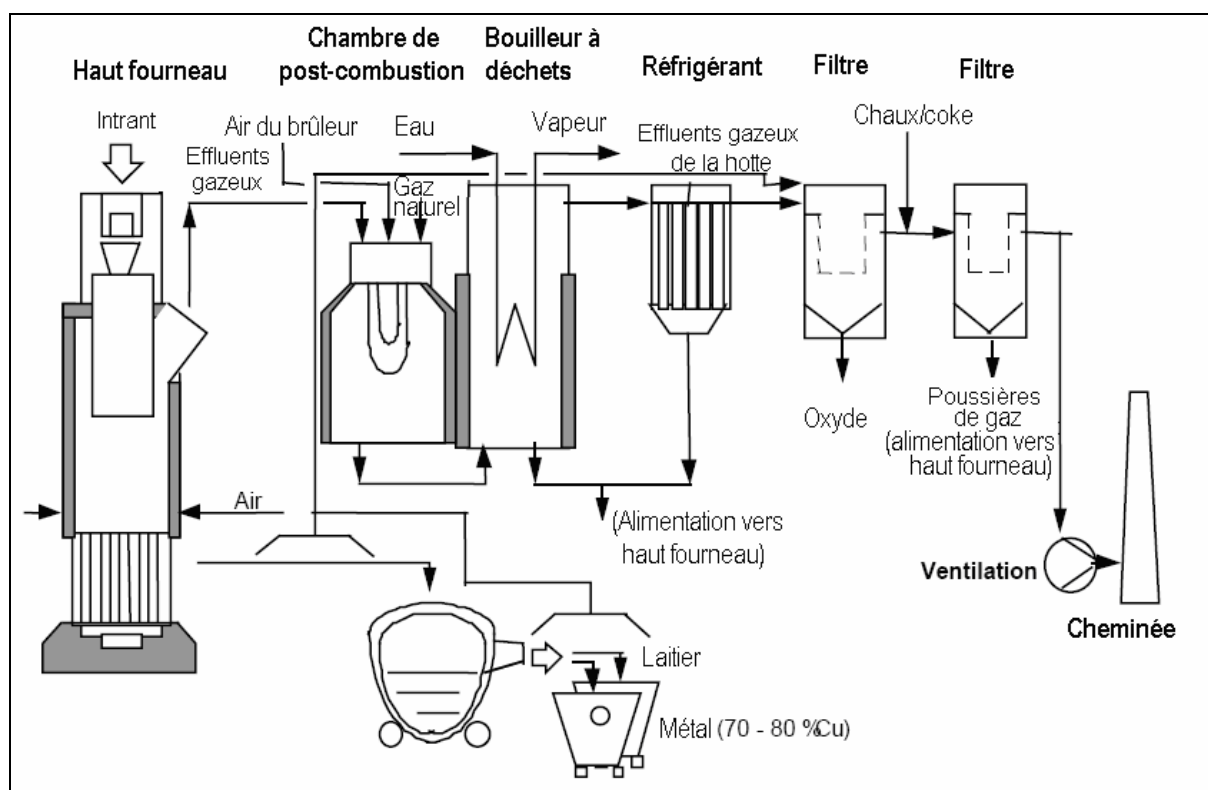


Figure 2.5: Haut fourneau pour la production de cuivre secondaire [tm 124, DFIU Cu 1999; tm 226, VDI 2102 1999] [SUR FIGURE : bouilleur à déchets → chaudière de récupération]

Les hauts fourneaux sont utilisés pour fondre et récupérer différents métaux dont les métaux précieux, le cuivre et le plomb à partir des matières premières primaires et secondaires ainsi que du ferromanganèse hautement carburé. Les récents développements permettent de charger des matériaux fins dans le four via les tuyères et cela permet d'éviter le briquetage et de réduire la manutention des matériaux poussiéreux.

Une application spécifique du haut fourneau est le haut fourneau Imperial (ISF) employé pour les concentrés mélangés de plomb/zinc. Ce fourneau emploie un condenseur de projections de plomb fondu après la section du haut fourneau pour collecter la vapeur de zinc libérée dans les gaz alors que le plomb est collecté sur la sole. Le zinc et le cadmium collectés dans le condenseur sont purifiés dans un système de distillation fractionnelle (colonne de distillation New Jersey).

2.6.2.3 Fours à arc électrique

Les fours à arc électrique fonctionnent selon le principe du passage d'un courant électrique alternatif important entre généralement une série de trois électrodes au carbone (pour une alimentation électrique triphasée) afin de créer des arcs électriques. Une alimentation en courant CC (courant continu) peut également être utilisée et dans ce cas, l'arc est en contact entre des électrodes et un garnissage de four au carbone.

Le four à arc électrique peut être composé des éléments principaux suivants :

- d'un équipement pour ajouter des minerais et des concentrés ou un mélange de matières premières dans le four.
- un équipement pour fournir de l'énergie électrique au four constitué d'une grille électrique, de transformateurs, d'une barre omnibus et d'électrodes.

- du corps ou de la cuve du four constitué(e) d'une chemise, du garnissage et de la hotte du four qui protège l'équipement de la chaleur et de la charge chimique.
- d'un équipement pour couler le métal et le laitier provenant du four.

Les matières premières peuvent être chargées dans le four de différentes manières. Pour les fours de petite taille, les matières premières peuvent être chargées manuellement ou à l'aide d'un véhicule de chargement. Le véhicule de chargement peut parfois également être utilisé pour les travaux nécessaires de frittage pour casser la formation de croûte dans la partie supérieure de la charge du four. Les fours à arc électrique de grande taille sont normalement chargés par des tubes de chargement où la charge circule des tubes à la sole de façon à ce que le matériau dans les tubes forme un joint étanche aux gaz dans le cas d'un four fermé.

Le système d'alimentation électrique va transformer l'énergie électrique qui est normalement à haute tension en un courant à haute intensité et à basse tension requis pour le procédé. Trois transformateurs de four sont placés autour de celui-ci afin d'obtenir une symétrie électrique. Le fonctionnement de transformateurs séparés présente certains avantages pour le contrôle du four. Les électrodes sont connectées au système d'alimentation électrique à travers la barre omnibus. Les électrodes peuvent être précuites ou de type Söderberg. Elles sont en graphite ou en carbone et consommées durant le procédé, de façon à être remplacées en continu.

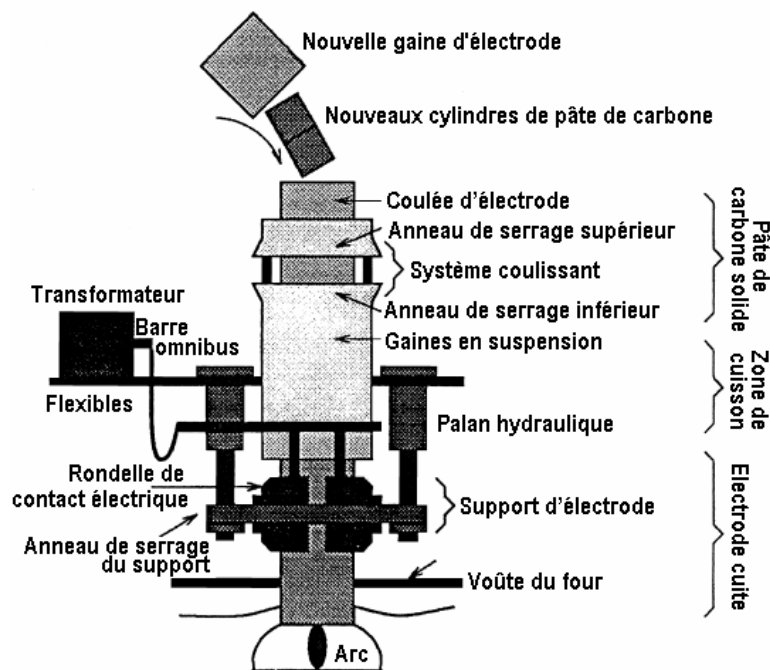


Figure 2.6: Système à électrode Söderberg dans un four à arc électrique

Le système Söderberg montré sur la figure 2.6 est basé sur une gaine d'électrode en acier extérieure qui agit pour former la pâte de carbone. La pâte de carbone est cuite sur une électrode fixe à l'intérieur de la gaine d'acier lorsque l'électrode est chauffée quand elle approche de la partie plus chaude du four. Une partie du chauffage est provoquée par le courant électrique dans l'électrode. Le carbone provenant des électrodes peut être consommé pour réduire les oxydes en un métal ou peut être utilisé par l'action de l'arc. Des concentrations importantes de monoxyde de carbone peuvent être produites. Certaines installations emploient des électrodes creuses qui permettent au matériau d'être chargé dans le four par le biais de l'électrode.

La matière première fournit une partie de la résistance dans le circuit électrique et favorise la formation de l'arc électrique qui produit les hautes températures. La profondeur d'insertion des électrodes règle la résistance. Il existe des fours à arc à courant direct qui utilisent des goujons d'anode ou des soles conductrices. Les fours à arc électrique peuvent fonctionner en discontinu ou en continu.

Les fours peuvent être ouverts, semi-étanches (l'extraction étant couramment réalisée par un quatrième trou dans la hotte) ou totalement étanches à l'aide de goulottes d'alimentation et de soupapes d'étanchéité pour le chargement. Dans ce dernier cas, tous les gaz du four sont extraits de manière efficace et traités, et peuvent être utilisés pour préchauffer la charge ou utilisés comme source de combustible. Les hottes et parfois le corps du four peuvent être refroidis à l'eau pour contrôler le procédé et éviter les dommages.

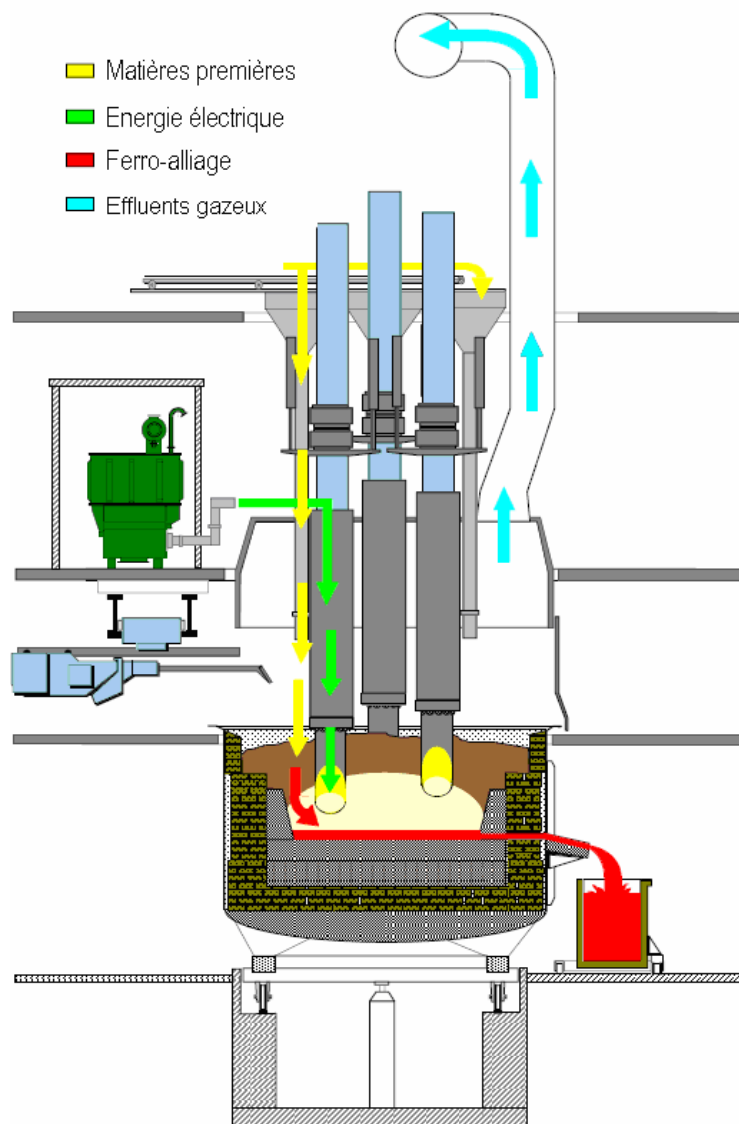


Figure 2.7: Four à arc électrique rotatif

Ces fours sont employés pour fondre toute une gamme de ferroalliages. Ils sont employés pour fondre et affiner les métaux réfractaires et les alliages à haute température et dans ce cas, ils fonctionnent sous vide.

Le four peut fonctionner en discontinu ou en continu avec une charge fondue. Dans ce dernier cas, les électrodes sont « immergées » dans le laitier et ne sont pas en contact avec un arc (sauf pendant le démarrage) mais fonctionnent comme un four à résistance électrique ou un Four à Arc Electrique Immergé.

2.6.2.4 Four (à résistance) électrique

Ce type de four emploie un agencement similaire au four à arc électrique. En fonction de la taille du four, 3 à 6 électrodes Söderberg ou précuites sont immergées dans la couche liquide. La température de fusion est maintenue au moyen d'un chauffage à résistance électrique. Le four fonctionne généralement en continu.

Des matières premières fondues ou solides sont chargées de différentes manières à l'aide de chenaux de coulée, de conduites d'alimentation ou par une électrode creuse. Des conditions d'étanchéité ou de semi-étanchéité sont faciles à maintenir. Dans les procédés de fusion, les concentrés de minerais grillés sont transférés vers le liquide fondu soit par le haut du four soit latéralement par des chargeurs individuels et les électrodes sont immergées dans la couche de laitier fondu.

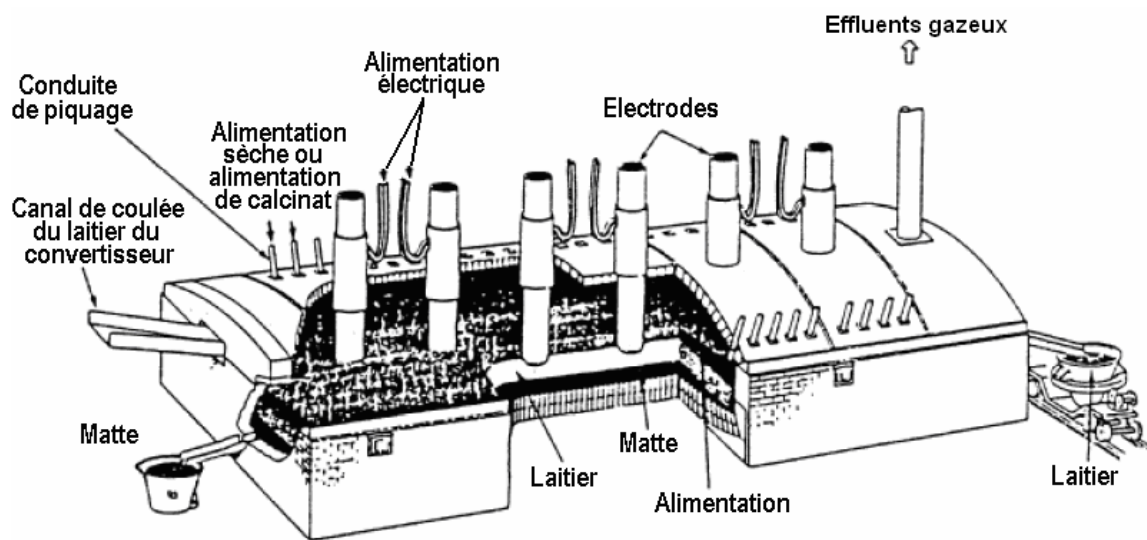


Figure 2.8: Four électrique pour la fusion de concentré ou de calcine

Ils peuvent fonctionner de différentes manières à l'aide du coke et d'agents favorisant la formation de laitier en fonction de l'application. Les électrodes de carbone sont consommées en même temps que les oxydes sont réduits mais les volumes de gaz produits pendant le fonctionnement sont maintenus à un minimum puisque aucun gaz n'est produit par la combustion d'un combustible. Ces fours sont généralement étanches et les gaz sont facilement captés et traités pour retirer et si possible réutiliser les poussières, le CO et le dioxyde de soufre.

Ces fours sont utilisés pour produire plusieurs métaux provenant de matières premières et secondaires dont les métaux précieux, le plomb et le cuivre et pour nettoyer le laitier [tm 124, DFIU Cu 1999]. Certains laitiers provenant de la première fusion par ex. du Cu, sont généralement traités dans des fours circulaires. Ils sont également employés pour récupérer des métaux précieux dont notamment l'argent.

2.6.2.5 Cuves et creusets à garnissage réfractaire

Ce sont de simples cuves en Al_2O_3 ou autre matériau réfractaire et cylindres d'acier à garnissage réfractaire qui sont placés pour former les creusets qui contiennent le procédé. Ils sont généralement utilisés pour les réactions métallo-thermiques. Les cuves et creusets à revêtement réfractaire sont souvent employés pour la production de ferroalliages spéciaux tels que le ferrovandium et le ferromolybdène ainsi que pour les métaux réfractaires.

2.6.2.6 Four ISA Smelt/Ausmelt

Ce four emploie une lance d'acier pour l'injection de gaz combustible, de combustible liquide ou de charbon et d'oxygène ou d'air dans un four à bain cylindrique. La lance est immergée dans le bain fondu et la formation d'un revêtement de laitier est nécessaire pour éviter une détérioration rapide.

D'autres matières premières sont chargées dans le four par un convoyeur étanche où elles réagissent à haut débit et sont fondues. La lance de combustion immergée agite le bain et produit un laitier avec le métal ou la matte souhaité(e). La séparation des phases fondues nécessite un four de décantation séparé depuis lequel les phases sont coulées séparément. Ce four peut être utilisé en discontinu si les conditions dans le four, tel que le gaz soufflé par la lance, sont modifiées en fin de séquence. Les exemples de fonctionnement en discontinu sont a) la fusion de matières secondaires de cuivre/plomb pour produire une matte cuivre plomb dans une première phase suivie d'une conversion de la matte en cuivre blister par soufflage avec de l'oxygène ; b) le traitement des déchets de lixiviation contenant du zinc. Le fonctionnement en continu est possible à l'aide de deux fours montés en série par ex. comme suggéré pour le procédé de production de plomb ISA.

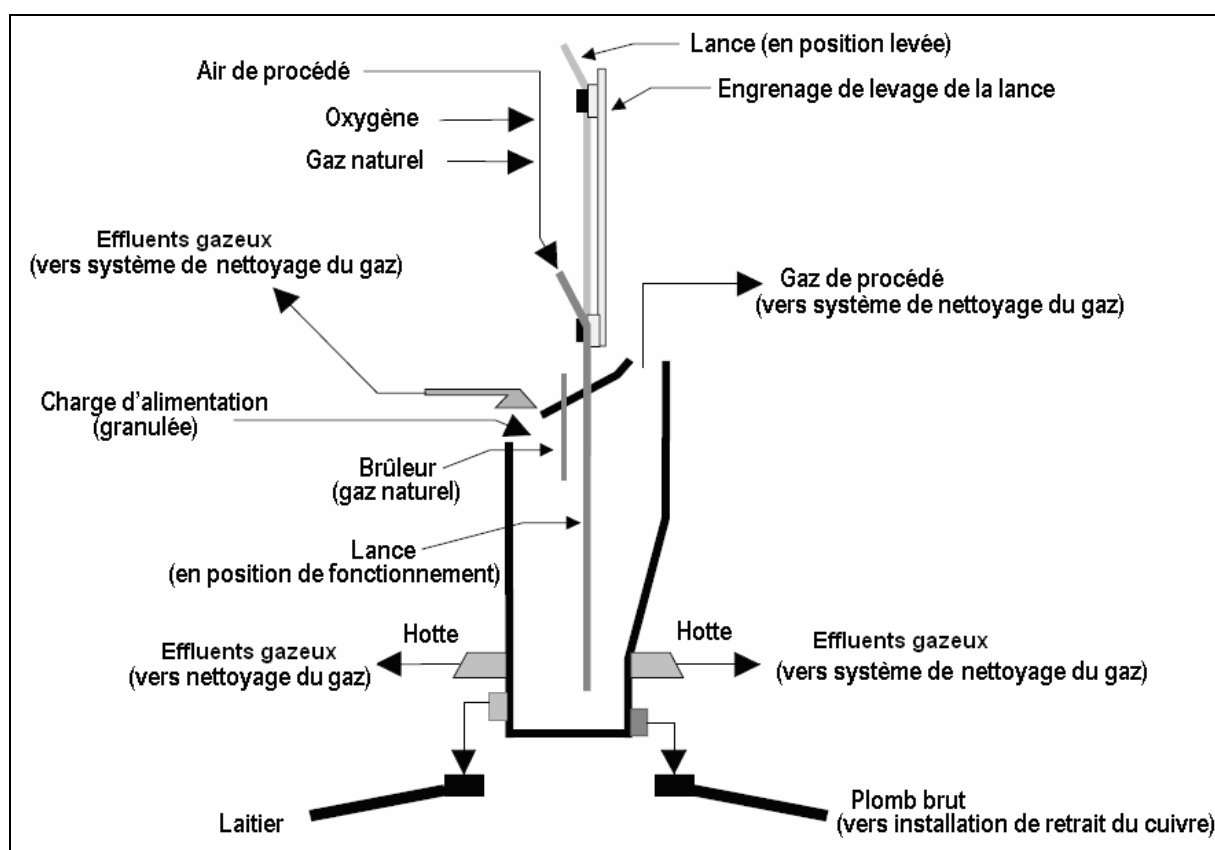


Figure 2.9: Procédé Ausmelt/ISA Smelt [tm 124, DFIU Cu 1999]

Ce four emploie un système de hotte et d'extraction robuste pour collecter et traiter les fumées provenant du système du four et des opérations de coulée. Lorsque des concentrés sulfurés sont fondus, les gaz passent à travers un système d'élimination du soufre.

Il existe un certain nombre d'applications pour ce type de four dont la production de matte de cuivre à partir de concentrés (ISA Smelt) et de conversion, de production de plomb à partir des matières premières et secondaires (ISA Smelt), le traitement de garnissage de poche usé et la vaporisation du zinc (Ausmelt) [tm 38 - 45, Ausmelt 1997]. Le four ISA Smelt est également employé pour produire le cuivre et le plomb à partir d'une charge en mélange. Ce four est employé pour la fusion directe en continu comme pour les opérations en discontinu ou par phases. Lors de la fusion de concentré de

cuivre pour produire une matte, le procédé emploie une charge humide qui est alimentée en continu avec les fondants dans le four.

2.6.2.7 Four tournant soufflé par le haut

Il s'agit d'un four rotatif et inclinable utilisant des lances pour chauffer et souffler. Ce four est petit et généralement logé dans une enceinte pour contenir les émissions secondaires qui sont traitées. La rotation du four favorise un bon mélange de la charge et une réaction complète des composants mais peut provoquer une abrasion du garnissage réfractaire.

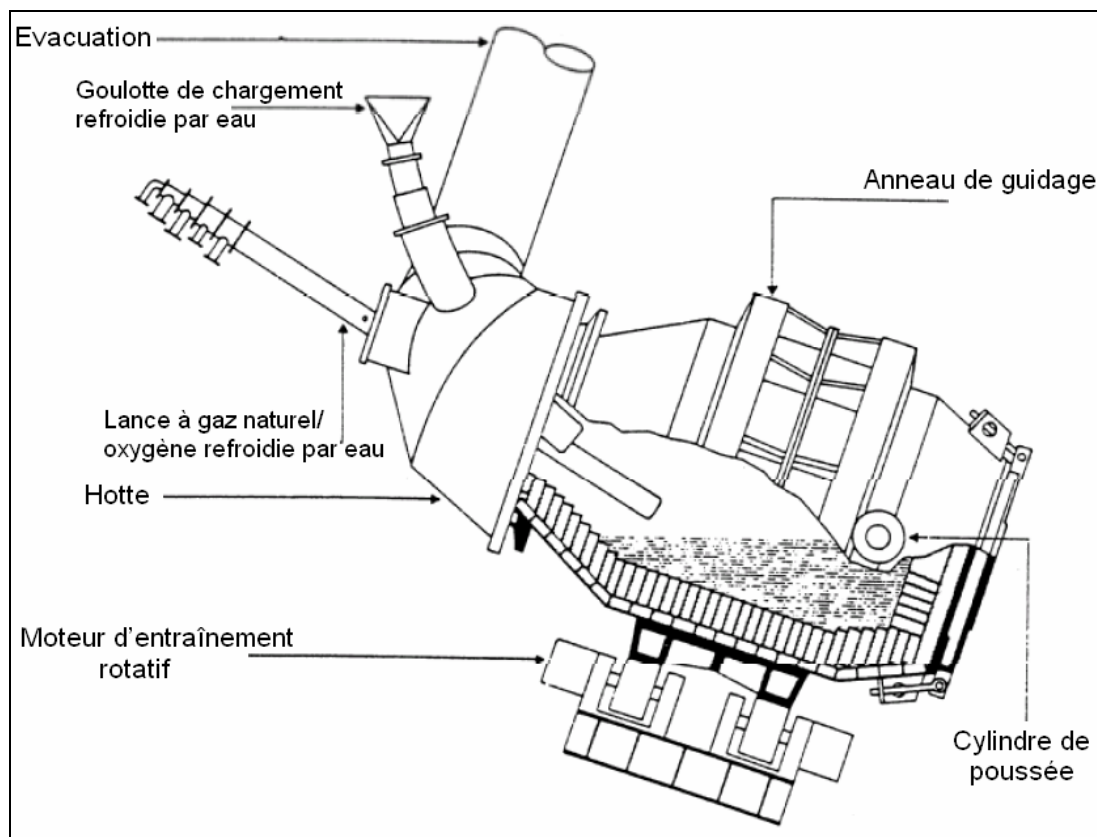


Figure 2.10 : Four tournant soufflé par le haut

L'oxygène et le combustible sont ajoutés via les lances qui soufflent sur la surface de la matière fondue. L'utilisation de l'oxygène produit de faibles volumes d'effluents gazeux et un niveau de dioxyde de soufre élevé lorsque les sulfures sont fondus. Ce procédé est généralement réalisé en discontinu et il est courant d'utiliser certains de ces fours pour la fusion, la conversion et le traitement du laitier.

Ce four est utilisé pour la fusion, la conversion et le traitement du laitier. Il est utilisé pour produire du cuivre et du plomb primaire et secondaire, du ferronickel et pour récupérer les métaux précieux.

D'autres conceptions commerciales de fours inclinables et rotatifs sont également employées pour la fusion et les exemples en sont le mini-four de fusion et le four d'oxycombustion inclinable et rotatif (TROF).

2.6.2.8 Procédés Noranda, El Teniente, Baiyin et Vanyucov

Le réacteur Noranda emploie un four à garnissage réfractaire cylindrique pour la fusion. Le concentré en granules et les additifs sont chargés dans le bain de laitier fondu sur le haut du four. Des brûleurs alimentés par du gaz naturel ou du combustible liquide placés aux deux extrémités produisent la

chaleur nécessaire au procédé. L'air riche en oxygène est soufflé dans le bain fondu par des tuyères, provoquant l'oxydation du soufre et du fer.

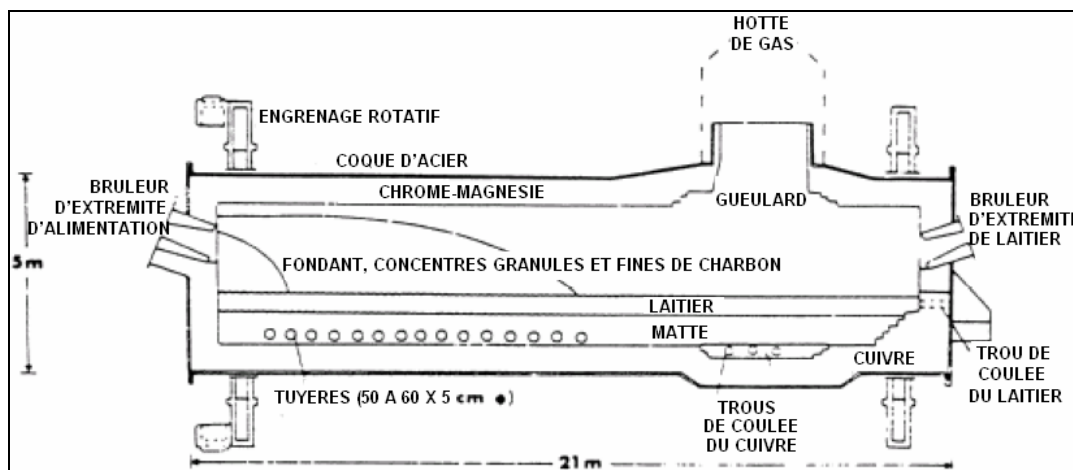


Figure 2.11: Réacteur Noranda

Pendant la fusion continue dans le four, les éléments fondus se séparent en deux phases liquides : du laitier et de la matte. En raison de leurs densités différentes, ils se déposent en formant deux couches. La matte est coulée de temps en temps depuis le bas du four et le laitier s'écoule en continu à l'opposé de l'extrémité de charge. Le four est muni d'une étanchéité et d'une extraction et les chenaux de coulée sont munis d'une extraction.

Ce procédé est employé pour fondre les concentrés de cuivre fondus et peut produire du cuivre blister en utilisant des concentrés avec des niveaux d'impuretés faibles ou de la matte haute qualité. La pratique de fonctionnement habituelle consiste à produire une matte riche en cuivre qui subit une conversion ultérieure.

Les procédés El Teniente, Baiyin et Vanyucov sont similaires au procédé Noranda. Dans le procédé El Teniente, des concentrés humides sont ajoutés au four à l'aide d'un pistolet Gar et des concentrés secs sont ajoutés via les tuyères. Au départ, une matte était injectée dans le four pour favoriser le procédé et produire du métal blanc. Le procédé Baiyin emploie un four rectangulaire divisé en zones de fusion et de décantation. Dans le procédé Vanyucov, l'air riche en oxygène est soufflé dans la couche de laitier plutôt que dans la couche de matte.

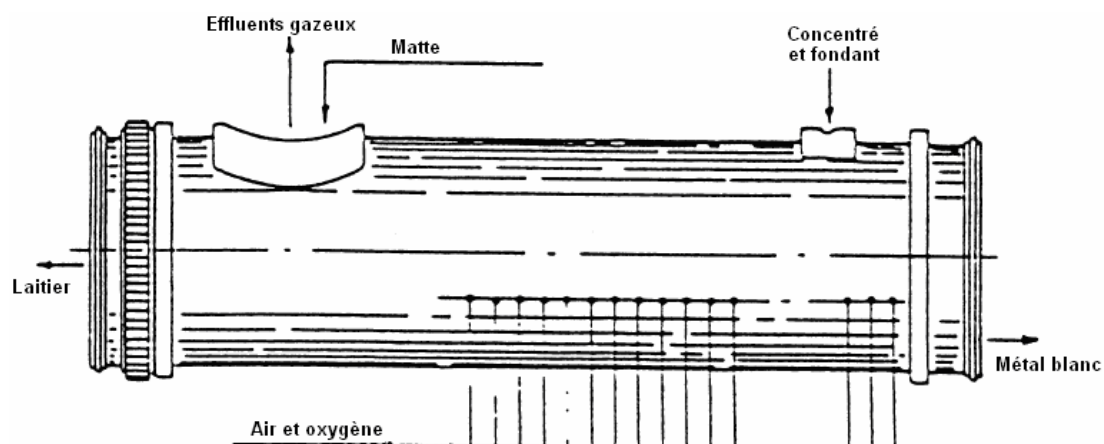


Figure 2.12 : Réacteur El Teniente

2.6.2.9 Procédé Mitsubishi

Ce procédé emploie trois fours interconnectés, un four de fusion de bain, un four électrique de traitement de laitier et un four de conversion. L'écoulement par gravité est employé entre les fours et évite le transfert par poche de coulée. Tous les fours sont munis d'une étanchéité et d'une extraction, la chaleur provenant des gaz est récupérée et traitée pour retirer les poussières et le dioxyde de soufre.

Les concentrés secs, l'air, l'oxygène et les additifs sont chargés dans le four à bain au moyen de lances et ensuite fondus pour former la matte (60 - 65% de teneur en cuivre) et le laitier. Ce mélange coule en continu à travers un canal dans le four à sole électrique qui sert de four de décantation pour séparer le laitier. La matte est évacuée en continu du four de décantation vers le four de conversion par un siphon.

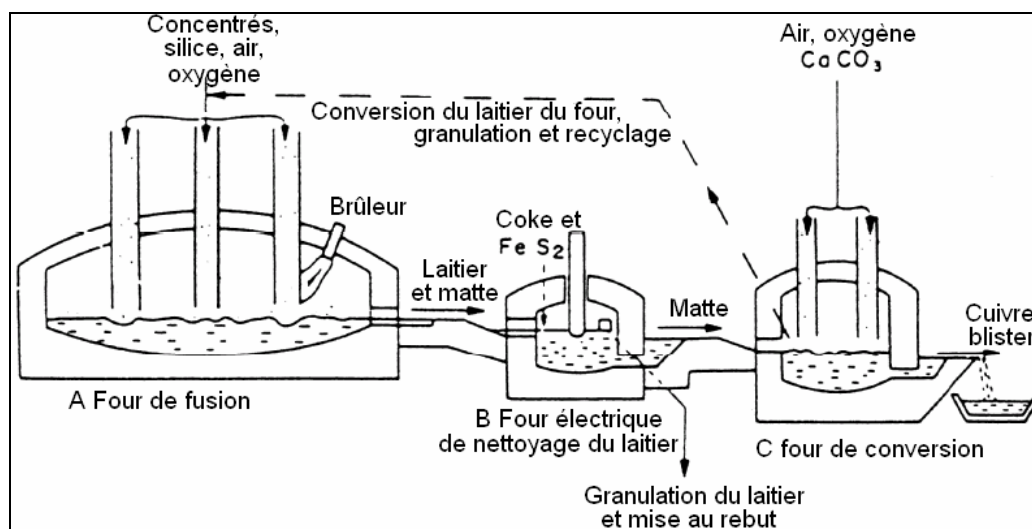


Figure 2.13: Procédé Mitsubishi

Dans le convertisseur, l'air, l'oxygène et les additifs sont soufflés sur le bain liquide via des lances refroidies à l'eau pour produire du cuivre blister. Les laitiers du convertisseur sont recyclés vers le four de fusion qui peut également être alimenté par des déchets d'anode. Il est possible d'utiliser l'étape du convertisseur avec d'autres fours de fusion.

Ce procédé produit du cuivre blister en continu.

2.6.2.10 Four QSL

Ce four est un cylindre horizontal divisé en une zone d'oxydation et une zone de réduction. Il est revêtu de briques en chrome-magnésie pour pouvoir résister à une température de 1250°C. Des tuyères au fond du four fournissent l'oxygène à la zone d'oxydation et un mélange d'air et de poussières de charbon à la zone de réduction du laitier. Les matières premières peuvent être humidifiées et taillées depuis des gros morceaux à des matériaux fins. Elles sont chargées dans le haut du four en étant mélangées à du charbon et des fondants.

La zone d'oxydation produit du plomb d'oeuvre, du dioxyde de soufre et un laitier riche en plomb. Celui-ci coule dans la zone de réduction de façon à ce qu'une quantité supplémentaire de plomb d'oeuvre soit produite, circule dans la direction inverse vers le trou de coulée du plomb. Le laitier est coulé depuis l'extrémité de réduction puis granulé. Le plomb d'oeuvre est vidangé depuis l'extrémité d'oxydation et affiné. Des hottes et des enceintes complètes servent d'évacuation aux sorties et aux chenaux de coulée. Les gaz émis sont utilisés pour récupérer la chaleur puis dépoussiérés avant de

passer dans une installation de production d'acide sulfurique. Les autres gaz de procédé sont traités dans des filtres à manches.

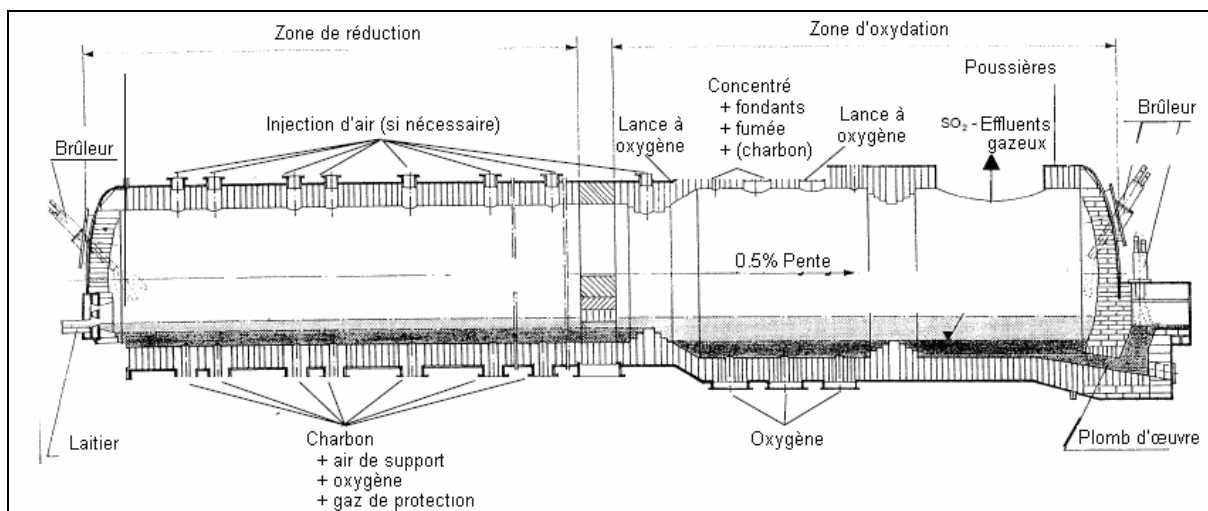


Figure 2.14 : Procédé QSL [tm 102, DFIU Zn 1999]

Le procédé QSL a été conçu pour produire du plomb à partir de concentrés et de certaines matières secondaires dans un four à bain unique et pour maximiser la récupération d'énergie.

2.6.2.11 Fours de fusion Cyclone

Ceux-ci comprennent le réacteur Flame Cyclone (FCR) et le réacteur Contop. Avec ces procédés à fusion instantanée haute intensité, les concentrés de cuivre et le fondant sont fondus avec de l'oxygène dans des chambres de combustion de type cyclone. Dans le procédé Contop, le cyclone est placé verticalement et le mélange qui a réagi tombe dans une chambre de décantation en-dessous du cyclone. Dans le procédé FCR, la combustion a lieu dans une cuve à réaction verticale et la séparation de la matte et du laitier se produit dans un autre réacteur horizontal. Le laitier et le métal blanc ou la matte riche en cuivre sont séparés dans l'avant-creuset et recueillis. Le métal blanc ou la matte est transformé(e) dans un convertisseur standard.

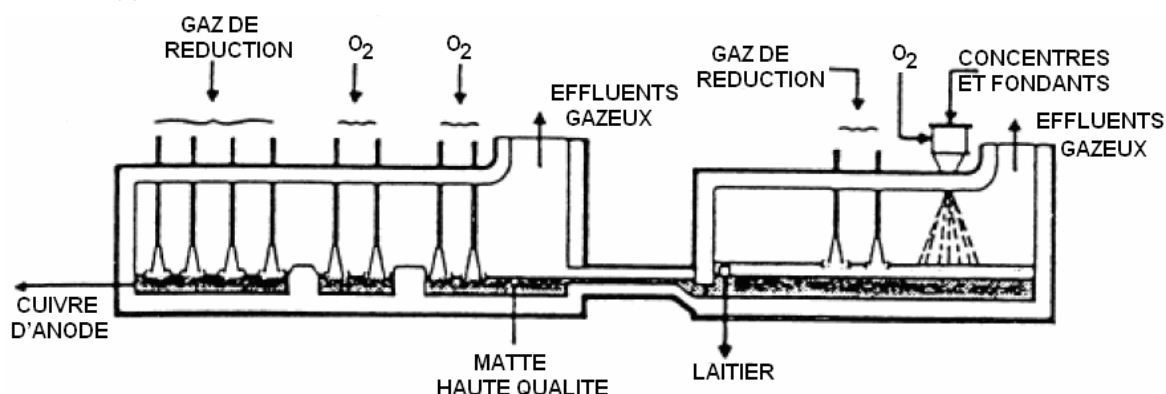


Figure 2.15 : Procédé Contop

Ces procédés sont principalement utilisés pour fondre les concentrés de cuivre.

2.6.2.12 Four flash Outokumpu

Il s'agit d'un procédé à fusion instantanée. Les concentrés séchés sont fondus en utilisant la teneur en énergie des concentrés pour produire la chaleur nécessaire à la fusion du concentré et du fondant. Le

mélange de charge en concentré est alimenté en continu avec l'air riche en oxygène à travers le brûleur de concentré dans la cuve à réaction verticale d'un four étanche où les réactions entre l'oxygène et le concentré se produisent rapidement en suspension. La chaleur de réaction fait fondre les particules. Les particules fondues produisent de la matte et du laitier. Du dioxyde de soufre est formé en parallèle. Dans des installations plus anciennes, le préchauffage de l'air de procédé à environ 200- 800°C était employé pour obtenir un fonctionnement autogène mais au moment de la rédaction du document, la majorité des installations obtiennent un fonctionnement autogène en utilisant un enrichissement à l'oxygène d'environ 30 – 90% dans l'air de procédé. Le degré d'enrichissement à l'oxygène est déterminé par la qualité du concentré et les exigences de bilan thermique. Le flux continu d'effluents gazeux quitte le four par le puit d'aspiration pour récupération de chaleur et dépoussiérage. Sa concentration en dioxyde de soufre est élevée et constante et le soufre est récupéré du gaz principalement par conversion en acide sulfurique après dépoussiérage.

Les particules de laitier et de matte fondus sont retirées du gaz dans un décanteur horizontal faisant partie du four formant un bain fondu où les phases se séparent sans décanteur externe. La matte est coulée hors du four vers des poches de coulée ou via des chenaux de coulée pour la granulation en fonction de la méthode de conversion employée. Le laitier est coulé en continu ou en semi-continu à la sortie du four et peut être transformé ultérieurement dans un four à laitier ou un circuit de flottaison de laitier pour récupérer le cuivre. Dans certaines installations, la faible teneur en cuivre dans le laitier permet au laitier produit dans le four de première fusion d'être mis de côté ou utilisé directement.

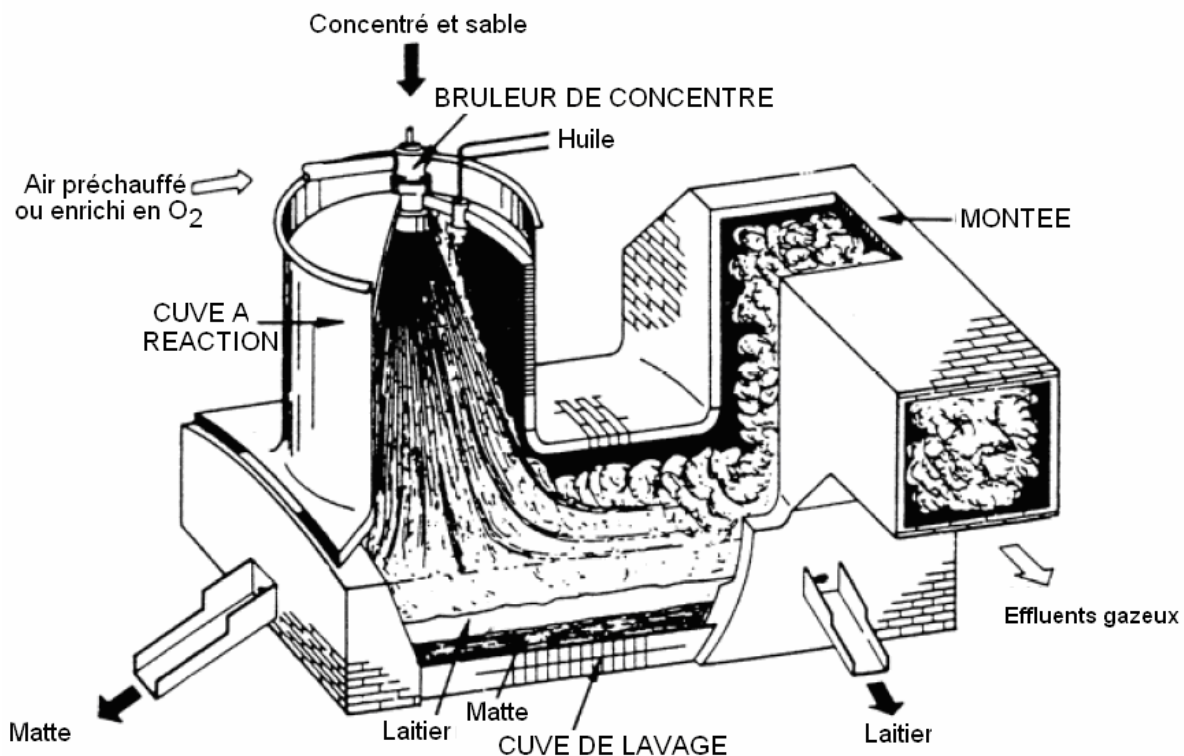


Figure 2.16 : Four Outokumpu [SUR LA FIGURE : huile → combustible liquide]

Ce four flash est prévu pour produire de la matte de cuivre et de nickel et du cuivre blister directement à partir des concentrés. Ce four produit une matte de haute qualité et la partie principale du soufre dans le concentré est ainsi libérée dans les gaz du four de fusion et permet au procédé de conversion (par ex. le convertisseur discontinu Peirce-Smith) d'éliminer plus facilement le soufre restant.

Ce four a été utilisé à une échelle de démonstration pour la production de plomb d'œuvre et pour vaporiser des déchets de Jarosite.

Le même type de four est également employé dans le procédé de conversion instantanée pour la conversion de matte moulue et granulée en cuivre blister. Le procédé a des caractéristiques similaires

au procédé de fusion instantanée, c'est-à-dire fonctionnement autogène avec de l'air riche en oxygène et une émission continue d'effluents gazeux avec une teneur élevée en dioxyde de soufre.

2.6.2.13 Four INCO

Il s'agit d'un four flash similaire au Four flash Outokumpu mais il utilise de l'oxygène pur pour fonctionner de manière autogène. Les concentrés de minerai de cuivre mélangés avec des agents favorisant la formation de scories sont soufflés horizontalement dans le four depuis les deux extrémités et les effluents gazeux sont captés au centre du four.

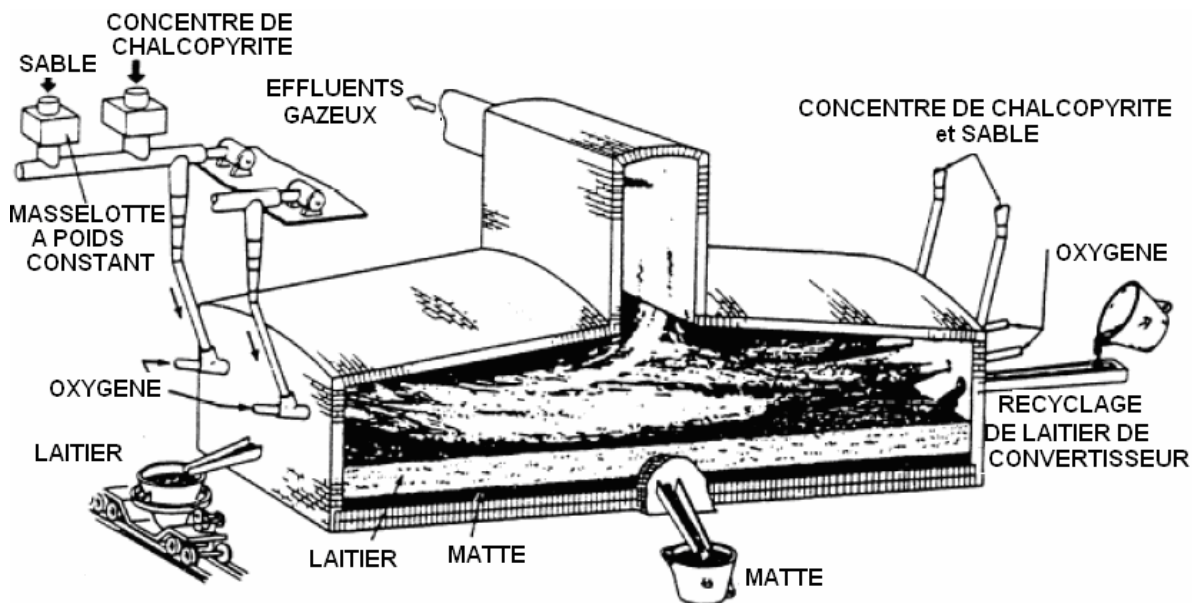


Figure 2.17 : Four INCO

Les concentrés sont grillés et fondus en suspension dans le four et tombent dans la cuve de décantation de la même manière qu'avec le Four flash Outokumpu. La chaleur produite par le grillage est suffisante pour un procédé de fusion auto-thermique. Le laitier, dont la teneur en cuivre est moyenne, s'écoule en continu à une extrémité du four et la matte est soutirée régulièrement au centre d'une paroi latérale. Le gaz émis contient jusqu'à 75% de SO_2 .

2.6.2.14 Four Kivcet (KSS)

Il s'agit d'un four flash similaire au four flash Outokumpu. Les composants de charge secs et mélangés et l'oxygène sont chargés en continu à travers des brûleurs au sommet dans une cuve d'oxydation. Du poussier de coke est ajouté parallèlement.

La charge est enflammée à son entrée dans la cuve à réaction, des températures jusqu'à 1400 °C sont atteintes et une dé-sulphuration complète a lieu immédiatement. Le poussier de coke n'est chauffé que lorsqu'il tombe dans la cuve. Le coke flotte sur le bain de laitier et réduit le PbO . Le laitier partiellement réduit et le métal d'œuvre flottent sous une cloison immergée dans la section de réduction du four qui est chauffée électriquement et où du coke ou du charbon supplémentaire est ajouté pour la réduction finale.

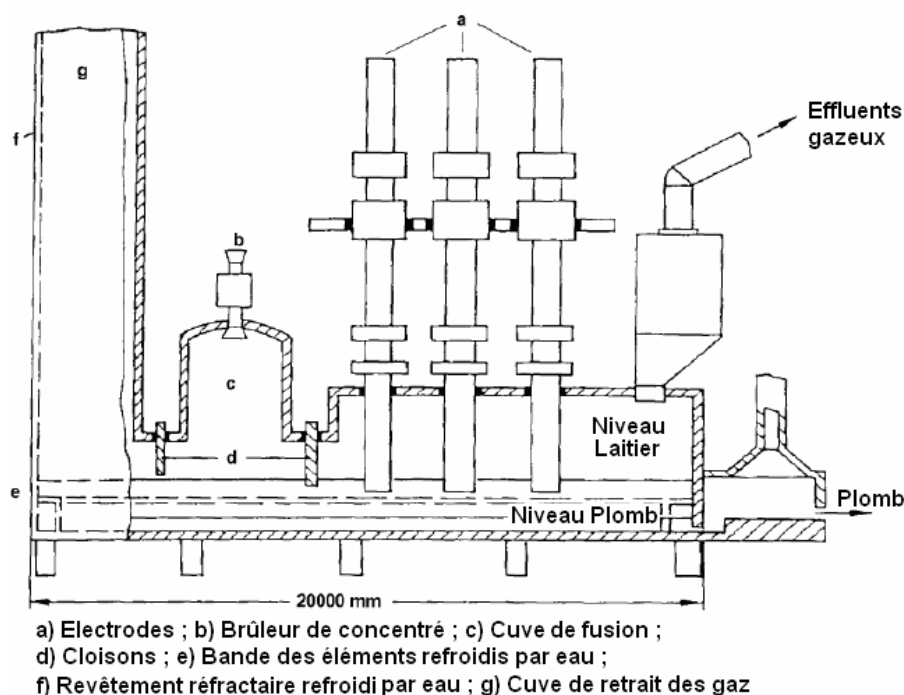


Figure 2.18 : Four Kivcet

Le plomb d'œuvre est envoyé pour affinage, le laitier peut être envoyé vers un four Waelz, les poussières émises par l'oxydation sont renvoyées directement au four. Les poussières émises par l'étape de réduction sont traitées dans un four ISF. Le procédé est également employé pour la production du cuivre.

2.6.3 Convertisseurs

2.6.3.1 Convertisseurs Peirce-Smith

Ces convertisseurs fonctionnent en discontinu et utilisent des tuyères pour souffler de l'air ou de l'oxygène dans la matte pour la faire réagir en deux phases afin de produire du cuivre blister ou de la matte de nickel haute qualité et du laitier. Ils sont également employés pour la production de ferronickel et de certains oxydes métalliques.

D'importants volumes de gaz chauds sont produits pendant les périodes de soufflage et sont captés au moyen de hottes placées au-dessus de l'ouverture du convertisseur. L'espace entre le logement du convertisseur et la hotte permet à de l'air secondaire de passer, ce qui provoque la dilution des gaz émis riches en SO_2 . La concentration en SO_2 varie en fonction du cycle du procédé. Pendant le soufflage initial, les concentrations de SO_2 peuvent être bien supérieures à 10%, pendant la période de soufflage suivante et lorsque le convertisseur est éloigné de la hotte, les concentrations de SO_2 sont largement inférieures et souvent nulles. Les variations de concentration SO_2 ne permettent pas d'alimenter de manière satisfaisante l'unité d'acide qui nécessite un débit relativement constant. Cela est résolu dans les installations multiconvertisseurs en réglant les convertisseurs pour qu'ils atteignent un flux relativement constant. Les gaz peuvent également être mélangés avec les gaz de four de fusion beaucoup plus chargés. L'utilisation de l'oxygène pour enrichir l'air soufflé va également augmenter la teneur en SO_2 toutefois l'enrichissement est limité en raison de l'usure rapide du réfractaire. Des hottes refroidies par eau sont désormais utilisées dans certaines installations.

Le convertisseur est chargé par des matte liquide via des poches de coulée et les laitiers générés pendant la conversion de la matte ainsi que pendant la production de cuivre blister sont ensuite versés dans des poches de coulée depuis le convertisseur. Des émissions fugitives se produisent pendant ces procédés de soutirage. L'emploi de systèmes d'extraction des fumées supplémentaires (par ex. hottes

secondaires et rideaux d'air) et le contrôle du positionnement du convertisseur pour éviter le soufflage pendant le roulement du convertisseur, peuvent réduire ces émissions. Des systèmes à chargement par hotte et par tuyère sont également utilisés de façon à ce qu'il ne soit pas toujours nécessaire d'incliner le convertisseur en l'éloignant de la hotte durant le chargement des déchets métalliques et des fondants.

Le format de four à tambour général adopté par ce type de convertisseur est également employé pour les **Fours à Anode** où le cuivre blister ou le cuivre noir produits par le convertisseur est affiné. Ces fours emploient des tuyères pour que de l'air supplémentaire soit soufflé, ce qui est suivi de l'ajout d'un agent réducteur (généralement du gaz naturel ou du propane) pour éliminer les dernières traces de soufre et convertir l'oxyde de cuivre en cuivre.

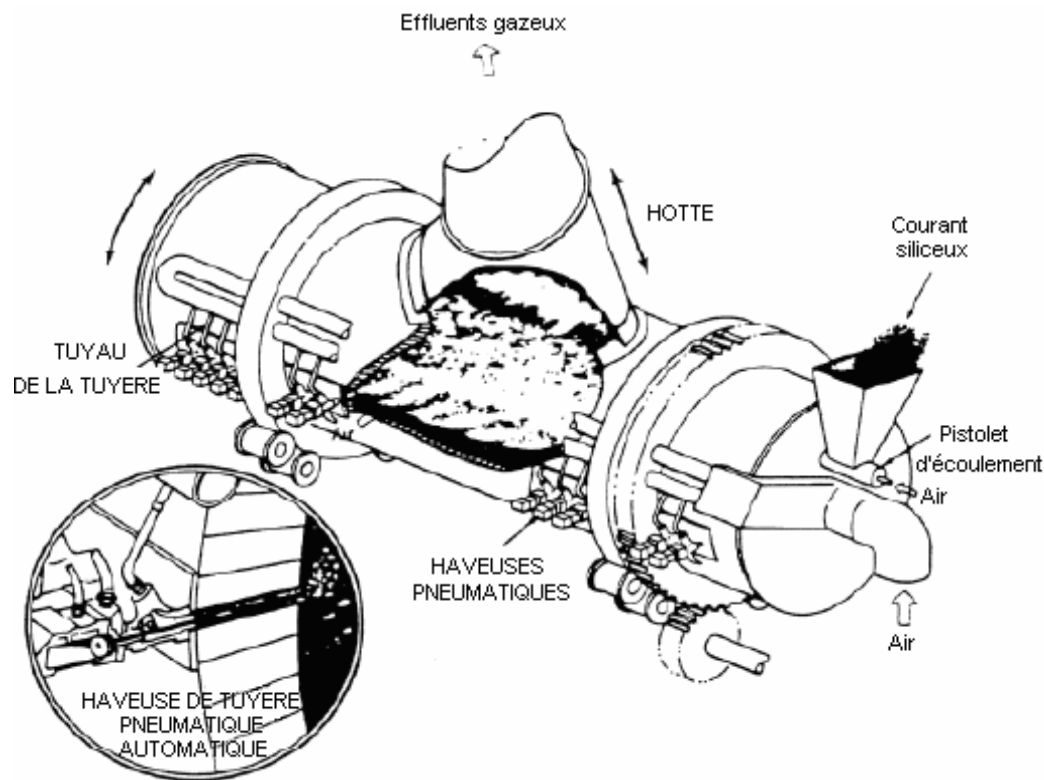


Figure 2.19 : Convertisseur Peirce-Smith

C'est de loin la cuve de conversion de matte la plus courante et ce convertisseur est utilisé pour produire de la matte de nickel haute qualité et de cuivre ainsi que pour l'affinage du ferronickel.

2.6.3.2 Convertisseurs Hoboken

Ils fonctionnent selon le même principe de soufflage que le convertisseur Peirce-Smith mais permettent d'éviter le rejet important de gaz qui se produit généralement lorsque le convertisseur est incliné pour le chargement et le soutirage du laitier et du cuivre brut.

Le gaz d'effluent est aspiré à travers le carneau en fin de convertisseur. Le siphon réduit au minimum le rejet de gaz durant toutes les phases de fonctionnement. Le convertisseur est chargé par une petite ouverture sur le dessus du logement et le chargement est par conséquent possible durant le soufflage sans incliner le convertisseur grâce à la durée plus courte du procédé. La dilution des gaz émis due à l'air infiltré est faible de façon à ce que la concentration moyenne de SO_2 est supérieure par rapport au convertisseur Peirce-Smith. Toutefois, la concentration de SO_2 variera durant tout le cycle.

Le résultat final est que la perte de SO_2 du convertisseur est plus faible. L'utilisation d'une ouverture plus petite pour charger peut créer des problèmes en raison de l'accumulation de laitier.

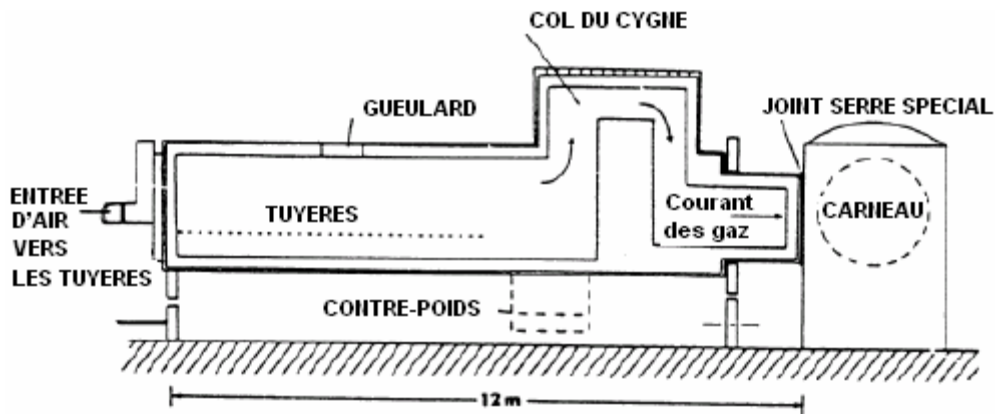


Figure 2.20 : Convertisseur Hoboken

2.6.3.3 Autres convertisseurs

Le four ISA Smelt/Ausmelt, le TBRC, la phase de conversion du procédé Mitsubishi et le convertisseur Noranda sont également employés comme convertisseurs. Ces fours utilisent la matte fondue comme charge. Le convertisseur OBM est utilisé pour le ferronickel. Le convertisseur flash (Kennecott/Outokumpu) est également employé, dans ce cas on emploie de la matte broyée comme charge. Le convertisseur Mitsubishi et le convertisseur Flash sont les seuls convertisseurs continus existant dans la métallurgie au moment de la rédaction du présent document.

2.6.4 Fours de fusion et d'affinage

2.6.4.1 Fours à induction

Ce sont de simples creusets ou canaux chauffés par un serpentin électrique externe, les fours à induction à canaux sont principalement utilisés pour la fusion d'éléments aux dimensions importantes. Dans un cas, le four à canaux est employé pour fondre des canettes en aluminium.

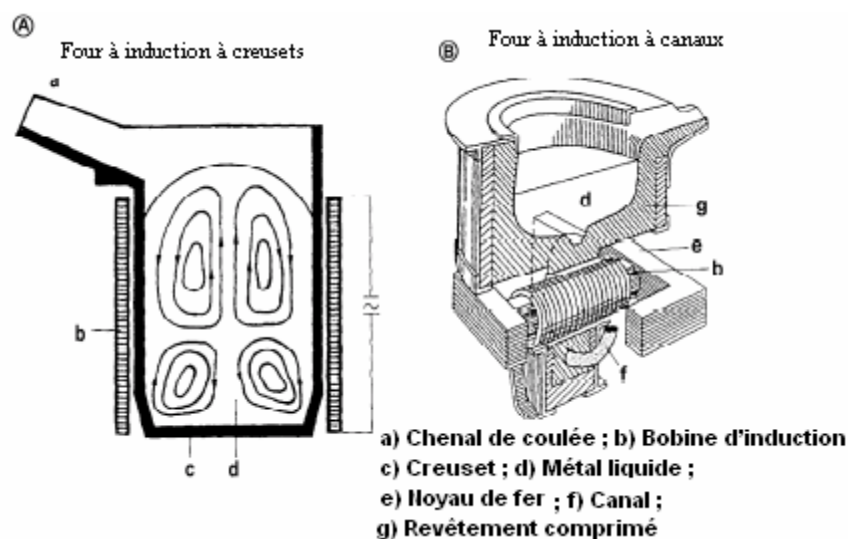


Figure 2.21 : Fours à induction

Le courant est induit dans le métal qui a été chargé dans le four et de la chaleur est générée. Ces fours sont équipés de hottes d'extraction des fumées et d'un système de dépoussiérage qui peuvent être utilisés durant les opérations de scorification et de versement. L'accès à un four à induction pour le chargement et la coulée signifie qu'un système de hottes mobiles est souvent utilisé. Les hottes sont robustes de manière à pouvoir résister aux impacts mécaniques. En variante, une extraction efficace fixe ou à lèvres est utilisée. L'efficacité de ce four peut être faible pour certains matériaux mais peut être augmentée, notamment si la charge est petite. Les éléments de grande taille peuvent être coupés pour améliorer l'efficacité et permettre aux hottes de captage des fumées d'être correctement utilisées. Certains procédés continus retiennent également un « pied de bain » de métal fondu au fond du four entre les charges si le fonctionnement le permet.

Ces fours sont employés pour de petites capacités de fusion jusqu'à 30 t généralement pour le cuivre, le laiton, le zinc et l'aluminium. Ils peuvent également fonctionner sous vide par exemple lors de la fusion de superalliages, d'acier hautement allié, de métaux purs et parfois pour la distillation de métaux. La température du four peut être contrôlée automatiquement pour réduire au minimum la production de fumées lors de la fusion de métaux volatils ou oxydants tels que le zinc ou des alliages contenant du zinc.

Ces fours sont également utilisés pour « retenir » le métal fondu pour la préparation des alliages et la coulée. Le courant induit dans ces fours mélange le métal de manière électromagnétique, ce qui active le mélange de la charge et de tout matériau d'alliage ajouté.

2.6.4.2 Cuves indirectes

Il s'agit de simples creusets chauffés de manière externe par les gaz de combustion provenant de la combustion de gaz ou de combustible liquide, de manière électrique ou pour des températures inférieures par un fluide thermique. Le contact avec une flamme directe est évité pour empêcher les points chauds locaux à la base du creuset et un bon contrôle de la température peut être maintenu dans la masse fondue de façon à éviter l'oxydation et la vaporisation du métal.

Ces cuves sont principalement utilisées pour la fusion du plomb propre et des alliages de plomb ainsi que du zinc et de ses alliages.

2.6.4.3 Four à cuve pour fondre le métal

Il s'agit d'un simple four vertical avec une sole de captage (à l'intérieur ou à l'extérieur du four), un système de brûleur à l'extrémité inférieure et un système de chargement de matériau sur le dessus. Les brûleurs fonctionnent généralement au gaz et sont conçus pour produire une atmosphère oxydante ou réductrice. Cela permet au métal d'être fondu avec ou sans oxydation. Le métal est chargé dans la partie haute du four et fond lorsqu'il descend dans la cuve. Un contrôle indépendant du rapport combustible/air est généralement prévu pour chaque brûleur. Une surveillance continue du CO ou de l'hydrogène est également prévue pour chaque rangée de brûleurs avec une surveillance en retour des gaz de combustion provenant de chaque brûleur. Les gaz de combustion sont généralement extraits et traités. Une chambre de post-combustion est parfois employée pour décomposer tout monoxyde de carbone, toute huile, tout COV ou toutes dioxines libéré(es). L'ajout d'oxygène au-dessus de la zone de fusion est employée pour permettre une post-combustion dans les niveaux supérieurs des fours à cuve ou des hauts fourneaux.

Le four est employé pour fondre du métal pur et parfois du métal contaminé par une matière organique. Si du métal huileux est alimenté dans le four, il passe à travers le gradient de température qui existe entre la zone de chargement et les brûleurs. La basse température peut produire un brouillard ou de la matière organique partiellement brûlée. Le four à cuve est également employé pour préchauffer la charge avant la fusion.

2.6.4.4 Procédé Contimelt

Ce procédé comprend deux fours interconnectés, un four à sole et un four à tambour. Le premier est un four vertical rectangulaire avec une chambre de collecte horizontale alimentée en cuivre blister ou noir et d'autres matières premières. Des brûleurs oxy-gas fournissent de la chaleur et la charge est fondue pour produire un cuivre affiné thermiquement et une petite quantité de laitier qui est séparée.

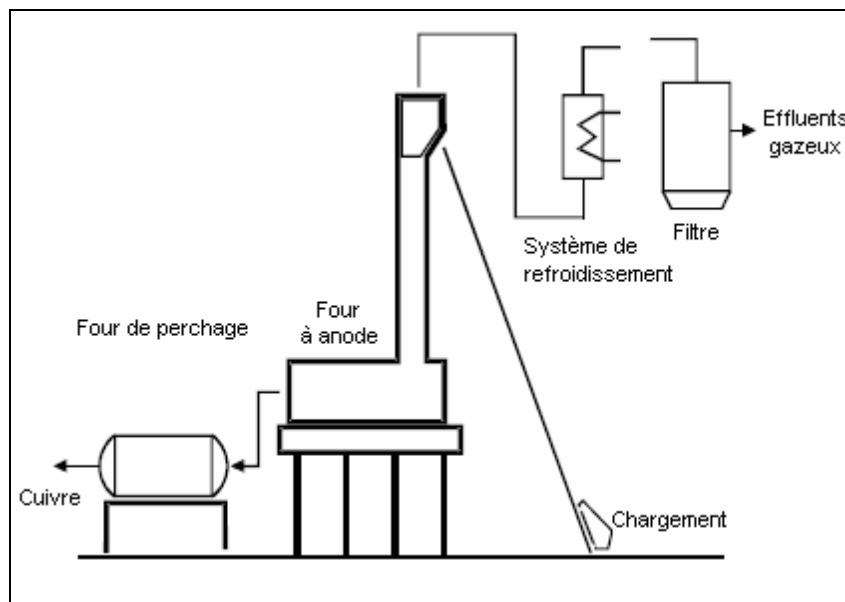


Figure 2.22 : Procédé Contimelt

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Le cuivre fondu s'écoule via un siphon et un chenal de coulée vers un four cylindrique horizontal où il est désoxydé avec du gaz naturel. Le cuivre affiné est ensuite coulé en anodes. Les gaz provenant du second four passent dans une post-combustion. Ils sont alors mélangés aux gaz extraits du premier four et passent dans une chaudière de récupération, un préchauffeur à air de brûleur, une phase de refroidissement et enfin un filtre à manches.

Les conditions de fonctionnement du four peuvent être commandées pour réduire au minimum l'oxydation du métal. La structure permet de récupérer la chaleur par la génération de vapeur ou le préchauffage de la charge.

Il s'agit d'un procédé continu en 2 phases pour fondre et traiter du cuivre noir et blister, des déchets de cuivre haute qualité et des déchets d'anode pour produire des anodes de cuivre. Un développement similaire dans l'industrie de l'aluminium est le procédé Meltower [tm 116, ALFED 1998]. Ce procédé utilise une tour de fusion verticale et comprend un préchauffage de la charge à l'aide d'effluents gazeux chauds.

2.6.4.5 Four à bombardement électronique

Les températures de fusion très élevées des métaux réfractaires comme le tungstène, le tantale ou le niobium ne permettent pas de réaliser la fusion dans un four normal. Le four à bombardement électronique a été développé pour les métaux ayant un point de fusion élevé. Il utilise des électrons accélérés comme source d'énergie pour transmettre leur énergie à la charge du four. La fusion à bombardement électronique est employée pour produire des métaux haute pureté et sans inclusion. Sa capacité à fondre des métaux de haute pureté est due à la source de chaleur à haute température parfaitement propre (électrons) et à la sole de cuivre refroidie par eau. Le métal fondu gèle contre le cuivre, de façon à ce que la masse fondue est uniquement en contact de son propre solide. La fusion et

l'affinage par bombardement électronique est un procédé bien établi pour la production de métaux réfractaires ultrapropres tels que le vanadium, le niobium, le tantale, le molybdène et le tungstène.

2.6.4.6 Four tournant

Il s'agit d'un cylindre rotatif à garnissage réfractaire muni d'un brûleur à une extrémité. Une porte de chargement est prévue à une extrémité et le brûleur peut être parfois logé dans celle-ci. Une oxy-combustion peut être employée. Les fours peuvent être « longs » ou « courts » et plusieurs variantes existent.

- Fours tournants courts : fusion de plomb secondaire, métaux précieux etc.
- Fours tournants longs : fusion et récupération de déchets d'aluminium etc.
- Four Thomas : fusion et affinage de déchets de cuivre etc.
- Four tournants avec tuyères immergées : affinage de cuivre noir ou blister, traitement de laitier etc.

La rotation du four peut être modifiée pour obtenir une réaction complète de la matière chargée et une haute efficacité. Les matières premières sont généralement chargées via une porte de chargement, cela est généralement réalisé dans une enceinte et avec une extraction pour éviter les émissions de fumées. Les fours utilisent du combustible liquide ou gazeux et on emploie couramment des oxy-brûleurs, la chaleur issue du brûleur est transférée à la paroi réfractaire et la charge est chauffée par le matériau réfractaire durant la rotation.

Les laitiers et le métal produits durant le procédé peuvent être soutirés depuis un trou de coulée sur la porte ou en un point central du four. Le trou de coulée est orienté par une rotation partielle du four afin de maintenir la séparation du métal et du laitier. La coulée depuis la porte permet de capter les fumées par un système d'extraction et d'enceinte unique. Des fours tournants inclinables sont également employés, ils offrent des taux de récupération améliorés pour certaines charges et nécessitent moins de fondants.

Différents métaux peuvent être fondus (première fusion et fusion) dans ces fours.

2.6.4.7 Four réverbère

Il s'agit d'un four à bain circulaire ou rectangulaire à garnissage réfractaire qui est allumé par des brûleurs montés sur la paroi ou sur le toit. Différents combustibles sont employés et des brûleurs d'oxycombustion peuvent être employés pour augmenter la vitesse de fusion. L'extraction et le traitement des gaz de combustion sont réalisés et les fours sont partiellement étanches. Des hottes et des chenaux de coulée sous abri réalisent l'extraction durant le soutirage et le chargement.

Le laitier ou les scories peuvent être retirés par raclage ou par coulée.

De nombreuses conceptions comprennent de larges portes d'accès permettant de charger des objets de grandes dimensions. Cela pose un problème d'étanchéité et d'extraction durant le chargement. Un refroidissement par eau des portes peut réduire ce problème en évitant le voilement de celles-ci. Des chariots de chargement étanches sont employés et des conduites de chargement peuvent être utilisées pour les concentrés. De la même manière, une étanchéité de porte peut être affectée par du matériau chargé de mauvaise manière dans le four. Dans certains cas, du métal ou du laitier renversé peut se solidifier dans l'ouverture et dans d'autres cas, un câble peut empêcher les portes de se fermer correctement.

La capacité de fusion d'un four réverbère n'est généralement pas élevée en raison du faible transfert de chaleur depuis le brûleur. L'efficacité peut être améliorée dans la pratique en utilisant l'enrichissement à l'oxygène ou des combinaisons de combustibles gazeux et solides pour augmenter la longueur de la flamme.

Ces fours sont employés pour la fusion en discontinu, l'affinage et le maintien en température de différents métaux.

2.6.5 Résumé

Four	Métaux	Matières premières utilisées	Commentaire
Sécheur à serpentín de vapeur Sécheur à lit fluidisé Sécheur flash	Cu et quelques autres	Concentrés	
Four rotatif	La plupart des métaux devant subir un séchage. Vaporisation du ZnO. Calcination de l'alumine, du Ni et ferroalliages. Brûlage de films photographiques pour production de métaux précieux. Déshuilage des déchets de Cu et d'Al.	Minerais, concentrés et déchets et résidus divers.	Applications de séchage, de calcination et de vaporisation. Utilisation comme incinérateur.
Four à lit fluidisé	Cuivre et zinc Al ₂ O ₃	Concentrés. Al(OH) ₃	Calcination et grillage.
Appareil de frittage à soufflage d'air	Zinc et plomb.	Concentrés et matières premières secondaires.	Frittage.
Appareil de frittage à extraction d'air	Zinc et plomb.	Concentrés et matières premières secondaires.	Frittage.
Appareil de frittage à convoyeur métallique	Ferroalliages, Mn, Nb.	Minerais.	D'autres applications sont possibles.
four à soles étagées Herreshoff	Mercure et métaux réfractaires Molybdène (récupération de rhénium)	Minerais et concentrés.	Grillage, calcination.

Tableau 2.5 : Fours de séchage, grillage, frittage et calcination

Four	Métaux	Matières premières utilisées	Commentaire
Creuset fermé à garnissage réfractaire	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques	
Four à creuset	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques	
Baiyin	Cuivre	Concentrés	
Four à arc électrique	Ferroalliages	Concentrés, minerai	
Contop/Cyclone	Cuivre	Concentrés	
Four à arc électrique immergé	Métaux précieux, cuivre, ferroalliages.	Laitier, matières secondaires, concentrés.	Pour la production de ferroalliages, les types ouvert, semi-fermé et fermé sont utilisés.
Four tournant	Aluminium, cuivre, métaux précieux	Déchets et autres mat. secondaires	Oxydation et réaction avec le substrat.
Four tournant basculant	Aluminium	Déchets et autres mat. secondaires	Minimise l'emploi de fondants salés.
Four réverbère	Aluminium, cuivre, autres	Déchets et autres mat. secondaires, cuivre noir	Première fusion de Cu oxydique, affinage
Vanyucov	Cuivre	Concentrés	
ISA Smelt/Ausmelt	Cuivre, plomb	Produits intermédiaires, concentrés et matières secondaires.	
QSL	Plomb	Concentrés et matières secondaires	
KIVCET	Plomb Cuivre	Concentrés et matières secondaires	
Noranda	Cuivre	Concentrés	
El Teniente	Cuivre	Concentrés	
TBRC TROF	Cuivre (TBRC) Métaux précieux	La plupart des matières secondaires y compris les boues	
Mini Smelter	Cuivre/plomb/étain	Déchets	
Haut-fourneau et ISF	Plomb, plomb/zinc, cuivre, métaux précieux, ferromanganèse à haute teneur en carbone.	Concentrés, la plupart des matières secondaires	Utilisé uniquement avec récupération d'énergie dans la production de ferromanganèse.
Four flash Inco	Cuivre, nickel	Concentrés	
Four flash Outokumpu	Cuivre, nickel	Concentrés	
Procédé Mitsubishi	Cuivre	Concentrés et déchets d'anode	
Peirce Smith	Cuivre (convertisseur), ferroalliages, production d'oxydes métalliques	Matte et déchets d'anode	
Hoboken	Cuivre (convertisseur)	Matte et déchets d'anode	
Convertisseur flash Outokumpu	Cuivre (convertisseur)	Matte	
Convertisseur Noranda	Cuivre (convertisseur)	Matte	
Convertisseur Mitsubishi	Cuivre (convertisseur)	Matte	

Tableau 2.6 : Fours de fusion et de conversion

Four	Métaux	Matières premières utilisées	Commentaire
À induction	La plupart	Métal de première fusion et déchets	L'agitation induite favorise le processus d'alliage. Procédé sous vide pour certains métaux.
Four de fusion à bombardement électronique	Métaux réfractaires	Métal de première fusion et déchets	
Rotatif	Aluminium, plomb	Déchets de diverses nuances.	Fondants et sels utilisés pour les matrices complexes.
Réverbère	Aluminium (primaire et secondaire)	Déchets de diverses nuances.	La configuration du bain ou de la sole peut varier. Fusion ou maintien en température
Contimelt	Cuivre	Anodes cuivre et déchets neufs	Système de four intégré.
À cuve	Cuivre	Cathodes cuivre et déchets neufs	Conditions réductrices.
Tambour (Thomas)	Cuivre	Déchets neufs de cuivre	Fusion, affinage thermique
Creusets chauffés (cuves indirectes)	Plomb, zinc	Déchets neufs	Fusion, affinage, alliage.
Creusets à chauffage direct	Métaux précieux	Métal de première fusion	Fusion, alliage.

Tableau 2.7 : Fours de fusion

2.6.6 Procédés électrochimiques

2.6.6.1 Extraction électrolytique

Une cellule électrolytique est employée et est constituée d'une anode inerte de plomb ou de titane et d'une cathode, placées dans un électrolyte aqueux contenant la solution de métal. La cathode est soit une fine feuille de métal pur (feuille de démarreur) ou une ancienne feuille d'acier inoxydable ou d'aluminium (plaque de cathode permanente). Les ions métalliques sortent de la solution et sont déposés sur la cathode, les gaz tels que le chlore ou l'oxygène sont produits à l'anode. Le chlore est capté dans un compartiment d'anode étanche mais l'oxygène est généralement émis et peut entraîner une partie de l'électrolyte et produire un brouillard d'acide qui peut nécessiter alors d'être capté et renvoyé au procédé. L'électrolyte appauvri est normalement renvoyé au procédé.

Le cuivre, le cobalt, le nickel, l'étain, le zinc et les métaux précieux sont produits de cette manière. Lorsque l'on utilise des plaques de cathode permanentes, les dépôts de métal pur peuvent être grattés, fondus et coulés dans selon une forme appropriée.

2.6.6.2 Électro-affinage

Une cellule électrolytique est employée et est constituée d'une anode coulée du métal à affiner et d'une cathode, placées dans un électrolyte contenant la solution de métal. La cathode est soit une fine feuille de métal pur (feuille de démarreur) ou une ancienne feuille d'acier inoxydable (plaque de cathode permanente). Les ions métalliques sont dissous de l'anode impure et passent en solution d'où ils sont déposés sur la cathode.

Le cuivre, l'étain, les métaux précieux et le plomb sont affinés de cette manière. Lorsque l'on utilise des plaques de cathode permanentes, les dépôts de métal pur peuvent être grattés, fondus et coulés selon une forme appropriée.

Durant l'affinage électrolytique, les autres métaux contenus dans les anodes sont séparés, les métaux solubles sont dissous dans l'électrolyte et les métaux insolubles comme les métaux précieux, le Se et le Te forment une boue anodique qui sédimente dans les cellules électrolytiques. Les boues d'anode sont régulièrement retirées des cellules et les métaux de valeur sont récupérés. Dans certains cas, des sacs d'anode sont employés pour contenir les boues.

Une partie de l'électrolyte est soutirée du système et les autres métaux sont récupérés de celle-ci.

2.6.6.3 Électrolyse en bain de sels fondus

Une cellule électrolytique est constituée de cathodes et d'anodes inertes (acier ou carbone) de façon à ce que les températures élevées de l'électrolyte puissent être maîtrisées. Le métal fondu est déposé sur la cathode et est retiré régulièrement par le vide ou par déplacement. Les gaz tels que le chlore ou l'oxygène sont libérés à l'anode ; le chlore est capté et recyclé ou vendu. Pour l'aluminium, l'oxygène réagit avec l'anode de carbone qui est consommée en continu.

L'électrolyse en bain de sels fondus peut être employée pour produire de l'aluminium, du lithium, du sodium et du magnésium.

2.6.7 Procédés hydrométallurgiques

Des acides et du NaOH, et parfois du Na_2CO_3 sont employés pour dissoudre la teneur en métal de différents minerais et concentrés avant l'affinage et l'extraction électrolytique. Le matériau à lixivier a généralement sous la forme d'oxyde, soit d'un minerai oxydique, soit d'un oxyde obtenu par grillage [tm 137, Copper Expert Group 1998]. La lixiviation directe de concentré de zinc est également réalisée sous pression élevée et atmosphérique. Certains minerais sulfurés de cuivre peuvent être lixiviés avec de l'acide sulfurique ou un autre agent, parfois des bactéries naturelles pour activer l'oxydation et la dissolution mais ce dernier moyen exige des temps de séjour très longs. De l'air, de l'oxygène ou du chlore sont parfois ajoutés aux systèmes de lixiviation afin d'assurer les conditions appropriées pour la dissolution et des solutions contenant du chlorure ferrique sont aussi employées. Les solutions produites par la lixiviation subissent ensuite divers traitements destinés à affiner le métal et à récupérer d'autres métaux. La pratique habituelle consiste à renvoyer les solutions appauvries dans la phase de lixiviation lorsque cela est possible afin d'économiser les acides et les solutions alcalines.

2.6.7.1 Lixiviation en tas

La lixiviation en tas ouverte est généralement réalisée à la mine. Le matériau est concassé et broyé pour permettre un contact étroit entre les particules et l'acide puis il est formé en tas naturels sur un garnissage étanche. De l'acide est pulvérisé sur les tas et traverse la masse [tm 130, Chadwick 1994]. Il est collecté sur le garnissage et recircule pour permettre à la teneur en métal de s'accumuler. Le temps de lixiviation d'un seul tas peut varier de 100 jours pour le minerai d'oxyde de cuivre à 500 jours pour le minerai sulfuré de cuivre.

2.6.7.2 Lixiviation atmosphérique (réservoir ouvert)

La lixiviation atmosphérique des oxydes et des concentrés est réalisée dans des réservoirs ouverts ou partiellement sous abri par la recirculation du mélange afin de maintenir la température et la concentration d'acides. Le système fonctionne généralement avec des réservoirs en série. La sédimentation survient ensuite afin de séparer les résidus, suivie de la purification et la récupération de la solution de métal. Certains résidus de lixiviation peuvent être encore lixiviés lorsque la force acide et la température sont augmentées. L'utilisation de plusieurs phases de lixiviation peut améliorer son

efficacité mais peut provoquer la dissolution de plus d'impuretés, notamment du fer, qui doivent être ensuite retirées.

2.6.7.3 Lixiviation sous pression (autoclave)

La lixiviation sous pression ou en autoclave peut être effectuée comme procédé de lixiviation complet ou comme partie d'une série de phases de lixiviation. Des cuves sous pression résistantes aux acides et aux bases sont utilisées et la solution est recirculée pour permettre aux réactions de se produire. De l'oxygène, de l'air ou du chlore peuvent être ajoutés pour augmenter l'oxydation. Les phases de réduction de la pression peuvent produire des brouillards d'acides et sont conçues pour les contenir.

2.6.7.4 Extraction par solvants

Les métaux peuvent être extraits des solutions aqueuses avec certains solvants organiques qui sont insolubles dans l'eau. Les phases aqueuse et organique sont dispersées l'une dans l'autre et en contrôlant le pH du mélange et de l'agent complexant employé, le métal ciblé est extrait dans la phase organique. Après la séparation de phase, une solution de métal pur est obtenue en extrayant de nouveau le métal de la phase organique vers une seconde phase aqueuse (décapage / stripping) à partir de laquelle le métal peut être récupéré de différentes manières. La figure suivante montre le principe d'un tel procédé.

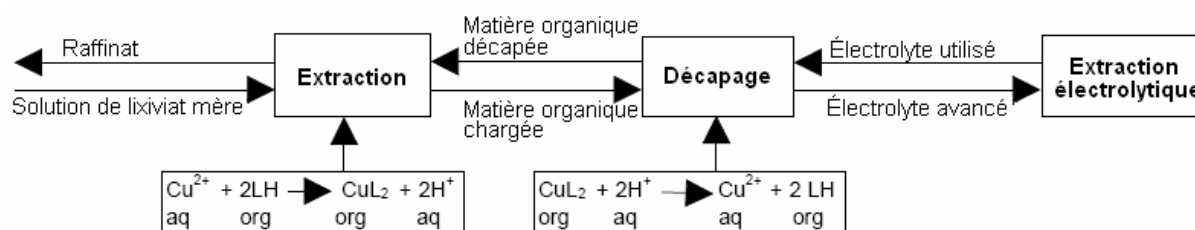


Figure 2.23 : Phases de procédé d'extraction par solvants (SX)

2.6.8 Techniques de régulation des procédés

Les principes des meilleures techniques disponibles incluent les concepts sur la manière dont un procédé est conçu, exploité et contrôlé, sur le nombre d'opérateurs nécessaire et sa maintenance. Ces facteurs permettent d'obtenir une bonne performance en termes de prévention et de minimisation des émissions, d'efficacité de procédé et de réduction des coûts. Une bonne régulation des procédés permet de réaliser cela et également de maintenir des conditions de sécurité.

Le fonctionnement et la régulation des procédés s'est récemment développé dans ce secteur et est appliqué à différents procédés. Les techniques suivantes sont employées :

L'échantillonnage et l'analyse des matières premières sont couramment employés pour contrôler les conditions de fonctionnement de l'usine. Il convient d'obtenir un bon mélange des différents matériaux de charge pour obtenir une efficacité de conversion optimale et réduire les émissions et les rejets.

Des systèmes de pesée et de dosage de l'alimentation sont utilisés de manière extensive. Les systèmes de silos à perte de poids, les bascules à bande et les balances à poids sont beaucoup utilisés à cet effet.

Des microprocesseurs permettent de contrôler la vitesse de la charge, les procédés critiques et les conditions de combustion et enfin les ajouts de gaz. Différents paramètres sont mesurés pour pouvoir réguler les procédés et des alarmes sont prévues pour les paramètres critiques :

- Surveillance en ligne de la température, de la pression (ou dépression) du four et du volume ou débit gazeux.

- Les composés gazeux (O_2 , SO_2 , CO) sont surveillés.
- Surveillance en ligne des vibrations pour détecter les blocages et les éventuelles défaillances des équipements.
- Surveillance en ligne du courant et de la tension des procédés électrolytiques.
- Surveillance en ligne des émissions pour contrôler les paramètres critiques de procédé.

Surveillance et contrôle de la température des fours de fusion pour empêcher la production de fumées contenant des métaux et des oxydes métalliques par une surchauffe.

Les gaz de procédé sont captés à l'aide de fours étanches ou semi-étanches. Des ventilateurs interactifs et à vitesse variable sont employés pour garantir que des vitesses de collecte des gaz optimales sont maintenues et pour minimiser les coûts d'énergie.

Les vapeurs de solvants sont captées et récupérées le plus possible. L'élimination supplémentaire des vapeurs de solvants est pratiquée pour éviter les émissions de COV et les odeurs.

Il conviendra de prévoir pour les opérateurs, ingénieurs et autres personnels un programme continu de formation et d'évaluation qui concernera l'application des instructions opératoires, l'utilisation des techniques de contrôle modernes décrites, la signification des alarmes et les actions à engager lors de leur déclenchement.

L'optimisation des niveaux de supervision permet de tirer le meilleur profit de ces dispositions et de maintenir la responsabilité des opérateurs.

Des systèmes de gestion environnementale et de la qualité sont employés.

Des études de risques et d'opérabilité sont réalisées aux phases de conception pour toute modification de procédé.

Des systèmes de maintenance robustes sont utilisés. On assiste à un recours croissant au personnel de maintenance dédié faisant partie des équipes d'opérateurs et venant renforcer les équipes de maintenance dédiées.

Des commentaires généraux sur certains aspects de la conception des procédés sont fournis dans les différentes sections du présent document ; ces aspects relatifs à la conception sont courants dans ce secteur. La conception du procédé dans sa globalité est traitée avec soin avec l'appui d'ingénieurs ayant l'expérience et la connaissance du procédé ainsi que de l'impact et des exigences en matière d'environnement.

Le laitier, le métal et la matte sont analysés sur la base d'échantillons prélevés par intervalles. L'analyse en ligne de ces flux est une technique émergente.

Pour certains procédés, il peut être nécessaire de prendre en compte des réglementations spécifiques telles que les Directives Seveso ou sur l'Incinération des Déchets.

2.7 Techniques de collecte des rejets gazeux

Les étapes de procédé impliquées dans la production des métaux non-ferreux incluent la production potentielle de poussières, de fumées et d'autres gaz provenant du stockage, de la manutention et du procédé. Les techniques de prévention des émissions fugitives des phases de stockage et de manutention sont couvertes antérieurement dans ce chapitre et la présente section traite des gaz de procédé. Ces techniques respectent la hiérarchie de prévention, de minimisation et de traitement des fumées.

L'étanchéité du four (ou l'utilisation de fours étanches) alliée à une régulation des procédés est la technique qu'il convient d'appliquer chaque fois que cela est possible afin d'éviter ou de contenir les émissions provenant d'une installation de procédé. La section relative aux fours indique où une étanchéité du four est possible et où d'autres techniques de collecte peuvent être employées pour fournir une collecte intégrale des gaz.

D'autres techniques existent pour capter les émissions qu'il est impossible d'éviter ou de contenir [tm 75, Theodore 1994; tm 76, Scapa 1998; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995]. Les gaz et les fumées qui s'échappent des procédés sont libérés dans la zone de travail puis s'échappent dans l'environnement voisin. Ils affectent par conséquent la santé et la sécurité des opérateurs et contribuent à l'impact environnemental du procédé. Des techniques de collecte des gaz de procédé sont employées pour éviter et minimiser ces émissions fugitives.

Les émissions fugitives sont très importantes mais difficiles à mesurer et à quantifier. Des méthodes permettant d'estimer les volumes de ventilation ou les taux de dépôt peuvent être employées pour les évaluer. Une méthode fiable est utilisée depuis de nombreuses années sur un site [tm 163, Steudtner 1998]. La méthode employée pour mesurer le volume et la composition des émissions de poussière fugitives s'est avérée fiable [tm 161, Petersen 1999] et les résultats de mesure sont reproduits ci-dessous. Les résultats montrent que l'ampleur des émissions fugitives peut être beaucoup plus importante que les émissions captées et réduites. Moins les émissions sont contrôlées et plus les émissions fugitives sont importantes. Les émissions fugitives peuvent être égales à plus de deux à trois fois la quantité des émissions contrôlées.

	Émissions de poussières, kg/a	
	Avant collecte secondaire supplémentaire des gaz (1992)	Après collecte secondaire supplémentaire des gaz (1996)
Production d'anodes, t/a	220 000	325 000
Émissions fugitives:		
Total fonderie	66 490	32 200
En toiture bâtiment	56 160	17 020
Émissions contrôlées des premières fusions:		
Four de fusion/unité d'acide	7 990	7 600
Cheminée hottes secondaires	2 547	2 116
Note : * Émissions après un investissement de 10 millions d'Euro afin d'améliorer la collecte des gaz fugitifs et le système de traitement. Energie supplémentaire = 13,6 GWh/a		

Tableau 2.8 : Comparaison des émissions de poussières fugitives et réduites sur un four de fusion de cuivre primaire [tm 161, Petersen 1999]

Des techniques LIDAR (Light Detection and Ranging) peuvent également être employées pour mesurer des composés gazeux fugitifs comme le SO₂ et les COV.

2.7.1 Techniques appliquées

Les poussières, les fumées et les gaz sont captés en utilisant des fours étanches, par des enceintes totales ou partielles ou par des hottes [tm 75, Theodore 1994]. Les fours étanches peuvent être chargés par une lance étanche ou des brûleurs, par des électrodes creuses, des hottes ou des tuyères ou par des systèmes d'ancrage qui créent une étanchéité avec le four durant le chargement. Les hottes sont conçues pour être le plus près possible de la source d'émission tout en laissant de la place pour le fonctionnement du procédé. Des hottes mobiles sont employées dans certaines applications et certains procédés emploient les hottes pour capter les fumées primaires et secondaires.

2.7.1.1 Utilisation de l'énergie

La collecte des gaz nécessite de déplacer des volumes d'air considérables. Cela peut consommer des quantités énormes d'électricité et la conception des systèmes modernes se concentre sur le captage afin d'augmenter le taux de captage et réduire au minimum le volume d'air déplacé [tm 124, DFIU Cu 1999]. La conception du système de collecte ou de hottes est très importante car ce facteur peut maintenir l'efficacité de captage sans consommation excessive d'électricité dans le reste du système. Les systèmes étanches comme les fours étanches permettent d'obtenir une très haute capacité de captage.

Des conduites et des ventilateurs sont employés pour acheminer les gaz captés vers les procédés de dépollution ou de traitement. La réussite de la collecte dépend de l'efficacité des hottes, de l'intégrité des conduites et de l'utilisation d'un bon système de contrôle de la pression/des débits. Des ventilateurs à vitesse variable sont employés pour fournir des vitesses d'extraction appropriées dans le cas de changements de conditions comme le volume de gaz, avec une consommation minimale d'énergie. Les systèmes peuvent également être conçus pour tenir compte des caractéristiques de l'installation qui leur est associée, c'est-à-dire l'unité de dépollution ou d'acide sulfurique. Une conception et une maintenance adéquates de ces systèmes sont pratiquées.

2.7.1.2 Critères de conception

Les systèmes de collecte et les taux d'extraction sont calculés sur la base d'informations fiables relatives aux caractéristiques du matériau à capter (taille, concentration etc.), à la forme du nuage de poussières en début et fin de l'opération et aux effets des modifications du volume, de la température et de la pression sur le système.

Le volume, la température et la pression du gaz sont mesurés ou calculés correctement afin d'assurer que des taux suffisants d'extraction sont maintenus durant les pics de débits gazeux. Certaines des caractéristiques des gaz et des poussières sont également critiques pour une bonne conception afin d'éviter les problèmes d'abrasion, de dépôt, de corrosion ou de condensation et celles-ci sont mesurées. Un autre facteur significatif est la fourniture d'un accès aux zones de remplissage ou de soutirage du four tout en maintenant de bons taux de collecte, il est fait appel à cet effet à l'expérience de l'opérateur au moment de la conception.

2.7.2 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

2.7.2.1 Voici quelques exemples de techniques à prendre en compte

Les techniques à prendre en compte sont basées sur l'application des principes de bonne pratique indiqués ci-dessus. La bonne pratique repose sur une conception et une maintenance professionnelles des systèmes de collecte et sur une surveillance en ligne des émissions dans les conduits des gaz propres. Les exemples suivants permettent d'illustrer les bonnes pratiques et ne constituent pas une liste exhaustive, d'autres exemples peuvent également s'appliquer.

- L'utilisation de fours étanches pour contenir les gaz et éviter les émissions fugitives. Les exemples en sont les fours de fusion étanches, les fours à arc électrique étanches et la cellule à alimentation ponctuelle étanche pour la production d'aluminium primaire. L'étanchéité du four repose toujours sur des taux d'extraction du gaz suffisants pour éviter la pressurisation du four. La cellule à alimentation ponctuelle illustrée est généralement raccordée à un système d'extraction correctement dimensionné fournissant un taux d'extraction suffisant pour éviter que les gaz ne s'échappent durant l'ouverture des capots des cellules pendant de courtes périodes, par ex. pour changer les anodes.

Cette technique est applicable seulement aux procédés nouveaux ou modifiés de manière extensive.

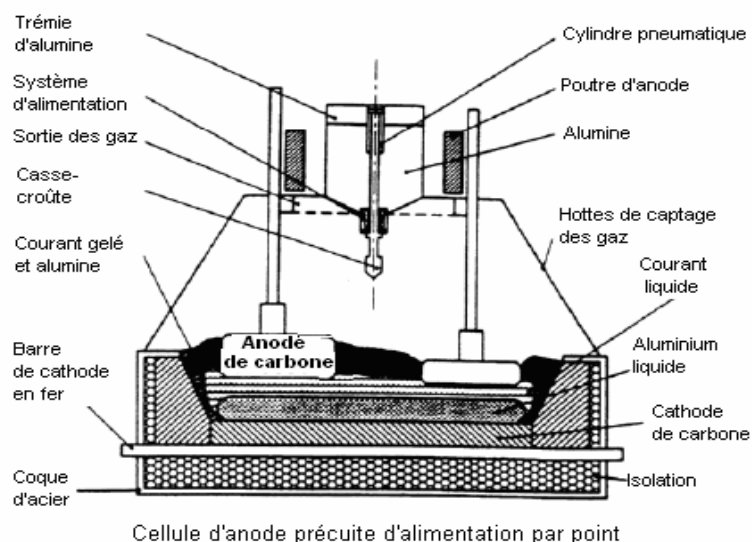


Figure 2.24 : Cellule d'anode préculée à alimentation ponctuelle

- L'utilisation de systèmes de chargement étanches pour éviter les émissions fugitives à l'ouverture du four. Les exemples sont l'utilisation de bascules de chargement qui créent une étanchéité contre la porte d'alimentation du four et l'emploi de systèmes de chargement par hotte. Ces techniques peuvent s'appliquer à la fois aux procédés nouveaux et existants et notamment aux procédés en discontinu.
- Une pratique importante établie pour obtenir une bonne extraction consiste à utiliser des commandes automatiques pour le tirage de façon à ce qu'il soit possible de cibler l'effort d'extraction vers la source de fumées sans consommer trop d'énergie. Les commandes permettent de changer automatiquement le point d'extraction pendant les différentes phases du procédé. Par exemple, le chargement et la coulée des fours ne se produisent généralement pas au même moment et les points de chargement et de coulée peuvent donc être conçus proches l'un de l'autre de façon à ce qu'un seul point d'extraction soit nécessaire. Le point d'extraction est également conçu pour permettre un bon accès au four et fournir un taux d'extraction satisfaisant. Les hottes sont robustes et reçoivent une maintenance adéquate.

On peut donner comme exemple l'adaptation d'un four rotatif court. La porte d'alimentation et les trous de coulée sont placés sur la même extrémité du four et la hotte de captage des fumées offre un accès intégral pour une poche de coulée de laitier et un convoyeur d'alimentation, elle est également suffisamment robuste pour résister aux impacts légers en cours d'utilisation.

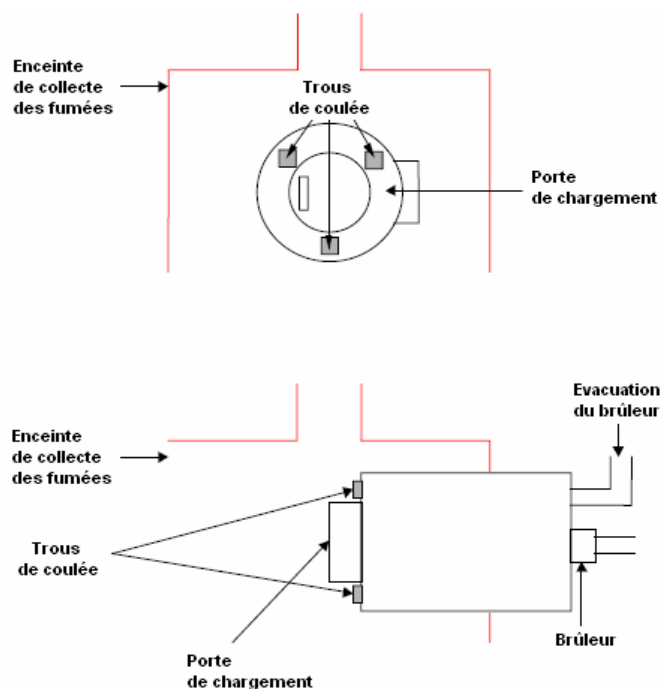


Figure 2.25 : Système de chargement et de vidange coïncidents

Ce principe s'applique facilement à un four rotatif court mais le principe de cibler l'effort d'extraction vers une source de fumées variable est également obtenu en commandant automatiquement les registres pour extraire la source principale de fumées durant le cycle de fonctionnement par ex. le chargement, la coulée etc.

Le four rotatif court et le four TBRC peuvent également être totalement fermés.

Ces techniques peuvent s'appliquer à tous les procédés nouveaux et existants et notamment aux procédés en discontinu.

Si des fours étanches ne sont pas disponibles, par exemple lorsque l'on modifie un four ouvert existant, une étanchéité maximale pour contenir les gaz du four peut être employée.

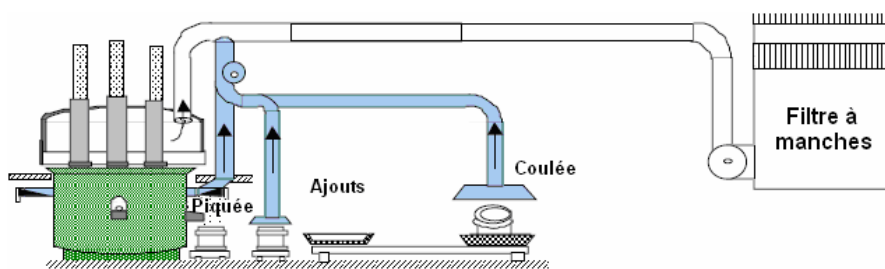


Figure 2.26 : Collecte des fumées sur un quatrième trou

On peut donner comme exemple l'utilisation d'un « quatrième trou » dans le toit d'un four à arc électrique pour extraire les gaz du procédé de manière aussi efficace que possible et est illustré sur la figure ci-dessus.

- La maintenance de la hotte du collecteur, des conduits, des filtres et du ventilateur est essentielle pour garantir le maintien des taux de collecte et d'extraction au niveau envisagé. Les dommages physiques provenant de la collision ou de l'abrasion, de dépôts dans les conduites et de dépôts sur les lames des ventilateurs constituent certains des problèmes rencontrés. Une inspection régulière

et une maintenance préventive permettent de les éviter. Cette technique peut s'appliquer à tous les procédés nouveaux et existants.

- La collecte des gaz d'un convertisseur discontinu peut être difficile car les transferts par poche de coulée interfèrent avec les hottes de captage. Certaines installations captent toutes les fumées provenant du toit en contrepartie de coûts d'énergie élevés. Une autre installation emploie un système pouvant inclure jusqu'à 3 hottes en plus de la hotte principale. Ces hottes peuvent être reliées soit à l'unité d'acide sulfurique (hotte 1) ou au système de traitement secondaire (hottes 2 & 3). Durant les opérations de remplissage et de versement, les hottes individuelles sont entraînées par moteur dans les positions garantissant une efficacité optimale de collecte. Le système de traitement des gaz est montré ultérieurement à la figure 2.28.

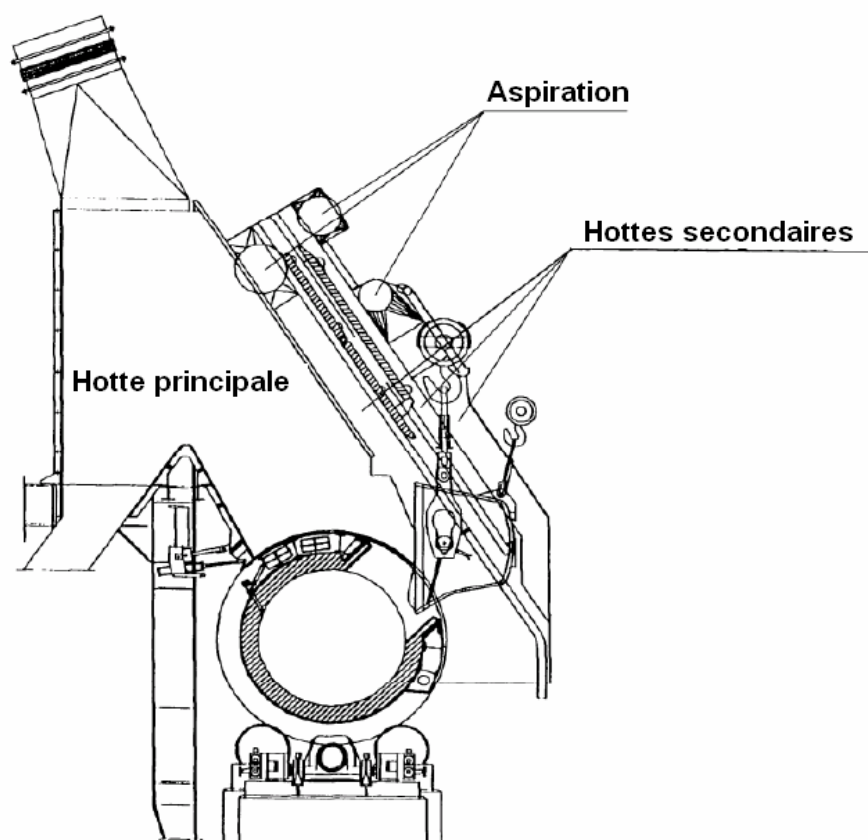


Figure 2.27 : Système de hottes secondaires pour convertisseur
[tm 201, Velten 1999]

2.7.2.2 Émissions fugitives

Une bonne extraction permet d'éviter les émissions fugitives comme illustré ci-dessus mais certains systèmes ne peuvent pas capter tous les gaz de procédé et ceux-ci sont libérés dans l'espace de travail puis émis par les événements du toit. Ces émissions sont particulièrement difficiles à mesurer mais des techniques peuvent être employées de manière efficace.

- Des échantillons du milieu environnemental peuvent être prélevés pour mesurer l'impact des émissions fugitives. Dans ce cas, des échantillons d'air ou de poussière sont prélevés sur une série de points définis par une modélisation atmosphérique. Une corrélation avec les conditions atmosphériques est nécessaire pour calculer les rejets.
- Les émissions fugitives d'un bâtiment comme une salle des fours peuvent être mesurés en prélevant des échantillons dans les ventilateurs du bâtiment. Le débit gazeux issu des ventilateurs

peut être calculé en mesurant la différence de température entre le air passant dans les ventilateurs et l'air ambiant [tm 163, Steudtner 1998].

Comme indiqué ci-dessus, les émissions fugitives peuvent être très élevées, c'est pourquoi s'il est impossible de les éviter ou de les réduire à un niveau acceptable, des systèmes secondaires de collecte des fumées peuvent être utilisés comme illustré dans les exemples ci-dessous.

- 1) Certains fours peuvent être munis de hottes secondaires pour éviter les émissions fugitives pendant le chargement ou la coulée comme décrit ci-dessous. L'aspiration par ventilateur est prévue directement à la source des fumées pour optimiser la réduction des émissions fugitives.

En variante, l'air pourrait être extrait par un ventilateur sur le toit mais un volume d'air important devrait alors être traité et risquerait de ne pas être traité efficacement dans un filtre à manches. Les autres inconvénients sont la consommation élevée d'énergie, les investissements élevés et plus de déchets (agent filtrant usé). Des systèmes secondaires de collecte des fumées sont conçus pour les cas spécifiques. La consommation d'énergie peut être réduite au minimum en commandant automatiquement le point d'extraction à l'aide de tirages et de la régulation de ventilateurs de façon à ce que les systèmes soient utilisés au moment et à l'endroit nécessaires, par exemple durant le chargement ou pendant le « roulement » d'un convertisseur.

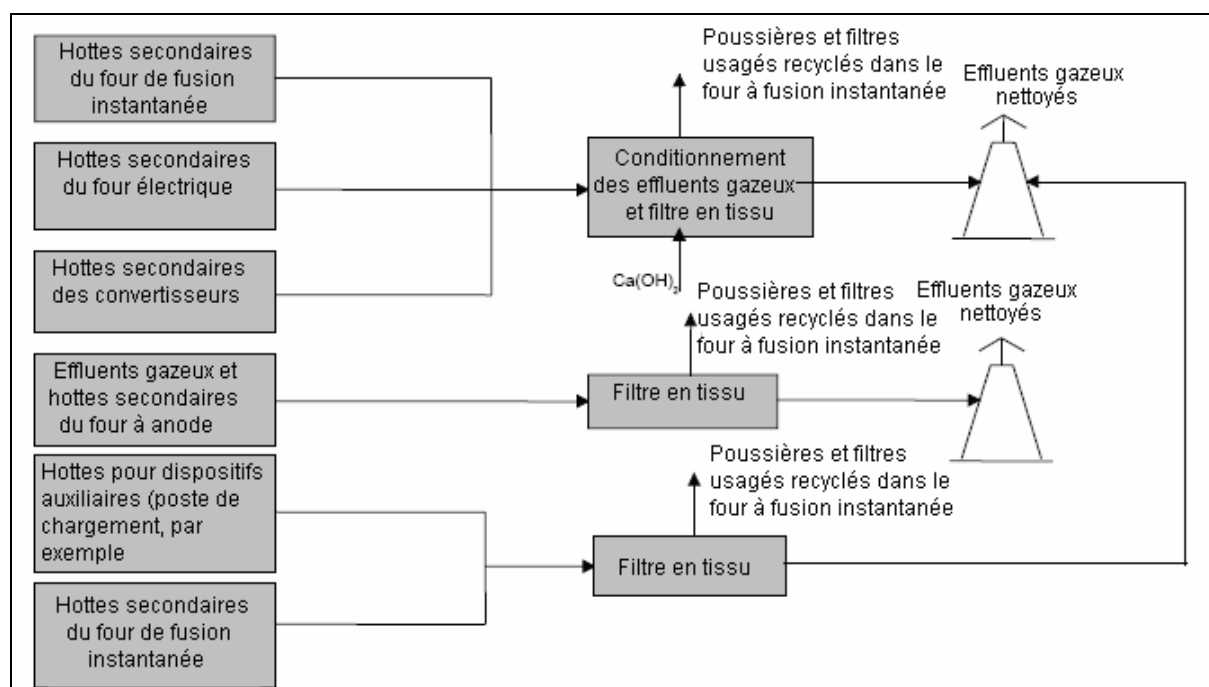


Figure 2.28 : Schéma du système secondaire de collecte des fumées pour un procédé de cuivre primaire
[tm 124, DFIU Cu 1999] [FIGURE : filtre en tissu → filtre à manches (2 fois)]

Dans le procédé ci-dessus, le débit d'air est contrôlé via un système de régulation en cycle fermé par des tirages réducteurs. Des ventilateurs avec commande de vitesse sont employés pour réduire la consommation d'énergie. 580 000 Nm³/h de gaz secondaires sont captés et traités dans des filtres à manches. 13,6 GWh/a d'énergie électrique sont consommés et 700 kg de poussières sont captés par heure [tm 124, DFIU Cu 1999].

- 2) L'exemple suivant montre comment les fumées de coulée issues d'un haut fourneau peuvent être captées dans un système secondaire de collecte des fumées.

L'équipement de dépoussiérage est composé de plusieurs hottes placées au-dessus du trou de coulée d'un haut fourneau, du chenal de coulée de métal principal et du dispositif dans lequel le métal fondu

est versé dans la poche-mélangeur. Les fumées captées sont traitées dans un filtre à manches séparé. Le système de hottes (vue du dessus du haut fourneau) est montré sur la figure suivante.

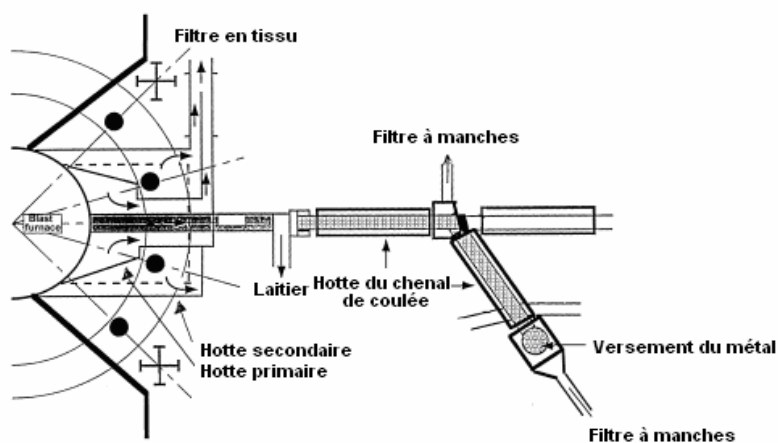


Figure 2.29 : Collecte des fumées du trou de coulée

[tm 195, SFPO 1999]

2.8 Techniques de récupération des gaz et de dépollution de l'air

Les gaz collectés sont transférés à l'installation de dépollution où les contaminants sont retirés et certains composés récupérés. Les gaz poussiéreux et acides sont couramment éliminés et les composés métalliques de valeur ou toxiques sont récupérés pour être utilisés dans d'autres procédés. La conception du procédé de dépollution est essentielle, des facteurs comme l'efficacité, l'applicabilité d'une méthode et les flux en entrée et en sortie de la substance à capter sont pris en compte.

2.8.1 Procédés et techniques appliqués

Les techniques de dépollution suivantes sont employées dans le secteur des métaux non-ferreux ; leurs principes de fonctionnement sont indiqués.

2.8.1.1 Élimination des poussières et des particules

Les techniques suivantes sont employées pour éliminer des particules comme les poussières et les fumées des différents procédés utilisés dans le secteur.

2.8.1.1.1 Electrofiltres

L'électrofiltre (EP) est très utilisé et est capable de fonctionner sur une gamme étendue de conditions de température, de pression et de charge de poussières. Il n'est pas particulièrement sensible à la taille des particules et capte les poussières à la fois dans les conditions humides et sèches. La résistance à la corrosion et à l'abrasion est intégrée dans sa conception [tm 75, Theodore 1994; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995; tm 222, VDI 3678 1998].

L'électrofiltre est constitué d'une série d'électrodes de décharge haute tension et d'électrodes de collecteur correspondantes. Les particules sont chargées puis séparées du courant gazeux sous l'influence du champ électrique généré entre les électrodes. Le champ électrique est appliqué à travers les électrodes par un petit courant direct à haute tension (100kV). En pratique, un électrofiltre est divisé en plusieurs champs distinctes (on utilise couramment jusqu'à 5 champs).

Les particules sont retirées du courant gazeux en quatre phases.

- application d'une charge électrique aux poussières
- placement des poussières chargées dans un champ électrique
- captage des poussières sur l'électrode réceptrice
- élimination des poussières de la surface de l'électrode

Les électrodes de décharge doivent être frappées ou vibrées pour éviter l'accumulation de poussières et leur résistance mécanique doit être compatible avec la transmission du frappe ou de la vibration. La fiabilité mécanique des électrodes de décharge et de leur cadre de support est importante car un seul fil cassé peut court-circuiter un champ électrique entier du filtre.

La performance d'un EP respecte la formule de Deutsch qui relie l'efficacité à la superficie totale des électrodes réceptrice, au débit volumique des gaz et à la vitesse de migration des particules. Par conséquent, pour des poussières données, maximiser la superficie des électrodes réceptrices est très importante et la pratique courante consiste à utiliser des espaces importants entre les électrodes. Cette pratique repose en retour sur une conception et un contrôle adéquats des redresseurs.

Le secteur emploie des redresseurs adéquats qui impliquent l'utilisation de sections de redresseur séparées pour chaque champ ou partie d'un champ de l'électrofiltre. Cela permet à la tension appliquée d'être modifiée dans les champs d'entrée et de sortie pour prendre en compte la diminution de la charge de poussières vers la sortie et permet de faire fonctionner les champs à des tensions plus élevées

progressives sans production d'étincelles. Une conception adéquate est également pratiquée en utilisant des systèmes de régulation automatiques. Ils maintiennent la haute tension (HT) optimale appliquée aux électrodes dans une zone précise sans production d'étincelles. Un dispositif de contrôle automatique est employé pour appliquer la tension maximale sans production d'étincelles et modifie constamment la HT. Les alimentations à HT fixe ne sont pas en mesure de fournir des efficacités de collecte optimales.

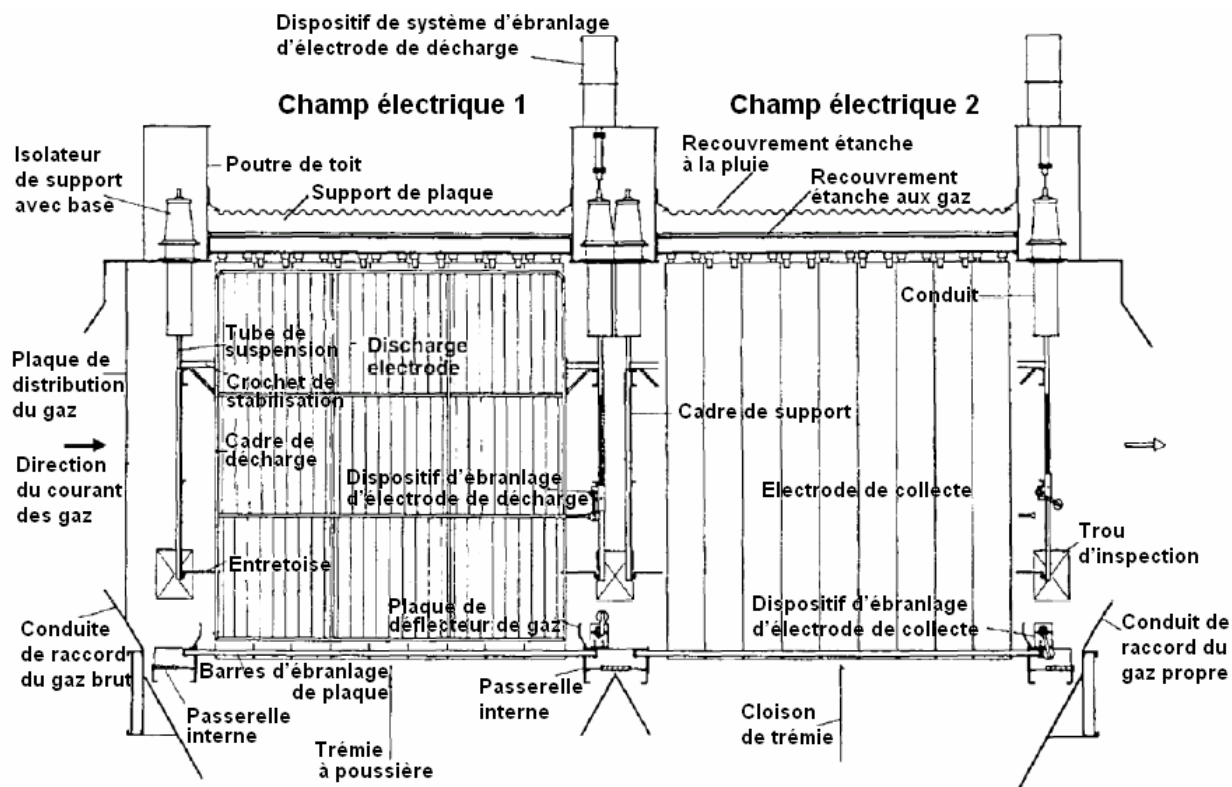


Figure 2.30 : Aménagement type d'un électrofiltre (seules deux champs sont montrés)

[tm 198, Lurgi 1999]

La résistivité (l'inverse de la conductivité) de la poussière est particulièrement importante. Si elle est trop basse, les particules atteignant l'électrode réceptrice perdent leur charge rapidement et les poussières peuvent être à nouveau entraînées. Lorsque la poussière a une résistivité trop importante, une couche isolante se forme sur l'électrode, ce qui empêche la décharge normale de la couronne et conduit à une baisse de l'efficacité de la collecte. La plupart des poussières ont une résistivité située dans une plage correcte et la collecte peut être améliorée en conditionnant les poussières. L'ammoniac et le trioxyde de soufre sont souvent utilisés. La résistivité peut également être réduite en baissant la température du gaz ou en ajoutant de l'humidité au gaz.

L'électrofiltre n'atteint généralement pas de concentrations de poussières en sortie de filtration aussi basses que celles atteintes par un filtre à manches. Pour maximiser l'efficacité d'un filtre, les écoulements gazeux à travers les unités sont optimisés pour fournir un débit uniforme afin d'éviter que le gaz ne contourne le champ électrique. Une conception correcte des conduites d'entrée et l'utilisation de dispositifs de répartition à l'intérieur de l'embouchure d'entrée permettent d'obtenir un débit uniforme à l'entrée du filtre. Dans ces conditions, on peut obtenir des émissions de poussières de l'ordre de 5 - 15 mg/ Nm³.

2.8.1.1.2 Electrofiltre humide

Les électrofiltres humides fonctionnent selon les mêmes principes. Dans ce cas, la poussière captée est évacuée des plaques du collecteur par un liquide approprié, généralement de l'eau, soit par

intermittence, soit par irrigation avec pulvérisation continue. Ces filtres présentent des avantages avec certaines poussières qui adhèrent aux plaques conventionnelles ou lorsque d'autres composés dans le courant gazeux interfèrent avec le fonctionnement, par ex. dans le cas d'un gaz humide et froid. Un effluent liquide est produit qui nécessite un traitement ultérieur.

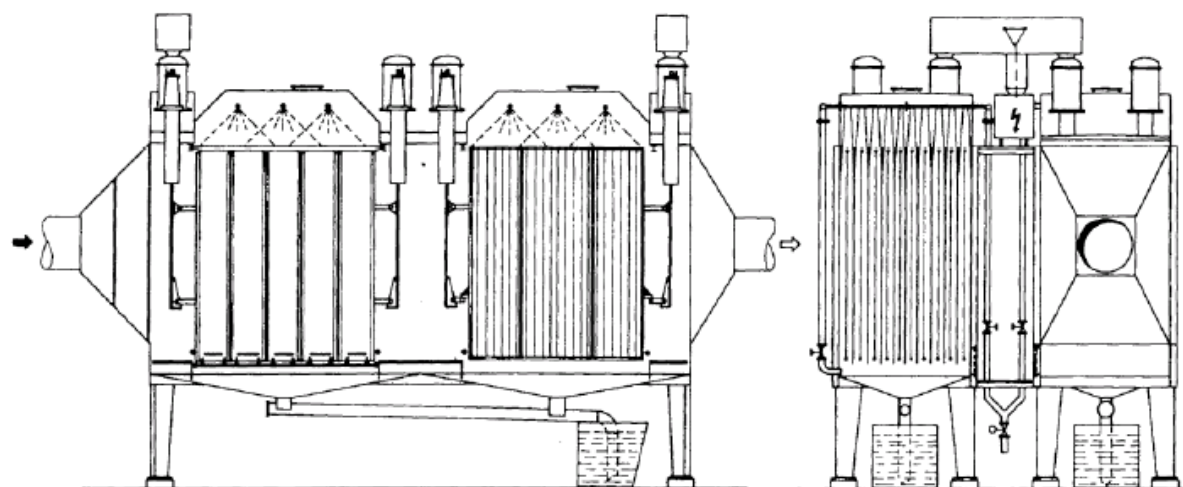


Figure 2.31 : Electrofiltre humide

[tm 198, Lurgi 1999]

2.8.1.1.3 Cyclones

Les cyclones étaient présents dans de nombreux procédés dans les années 1980 et sont encore largement répandus. Le cyclone est un dispositif de traitement de gaz inertiel. La poussière est séparée du flux gazeux lorsque la direction du flux est modifiée et la poussière continue dans la direction de départ grâce à son inertie et est déposée sur une surface de collecte.

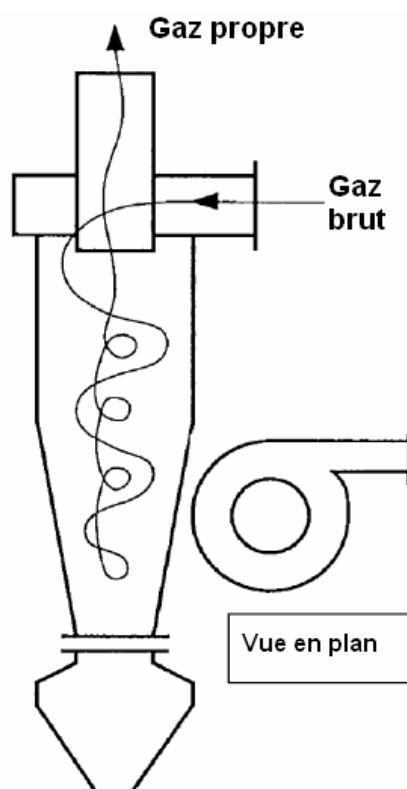


Figure 2.32 : Organisation d'un cyclone

[tm 198, Lurgi 1999]

Le gaz d'entrée est acheminé dans un courant en spirale. Les forces centripètes opérant à l'intérieur de la spirale provoquent le changement de direction et les particules au-dessus d'une masse critique vont être déposées sur les parois du cyclone.

Les cyclones ne sont généralement pas appropriés pour contrôler les émissions issues directement des procédés dans ce secteur. L'efficacité de la collecte des poussières fines est trop faible pour traiter efficacement les rejets des fours. L'expérience pratique a montré qu'ils ne sont pas capables de satisfaire les normes de rejets modernes. Cependant, les cyclones sont efficaces comme collecteur primaire en association avec une autre technique, notamment sur des procédés de grande taille où les débits peuvent varier [tm 75, Theodore 1994; tm 220, VDI 3476 1990].

2.8.1.1.4 Filtres à manches

Les systèmes de filtres à manches sont utilisés pour de nombreuses applications dans tout le secteur en raison de leur haute efficacité de collecte des particules fines que l'on rencontre lors des opérations de fusion [tm 75, Theodore 1994; tm 79, Soud 1995; tm221, VDI 3677 1997]. Cependant, étant donné leur tendance à colmater dans certaines conditions et leur sensibilité au feu, ils ne conviennent pas à toutes les applications. Des chambres de décantation et de refroidissement mais également des chaudières de récupération sont utilisés avant les filtres à manches afin de réduire l'occurrence d'incendie, pour conditionner les particules et pour récupérer le contenu thermique des effluents gazeux avant le dépoussiérage.

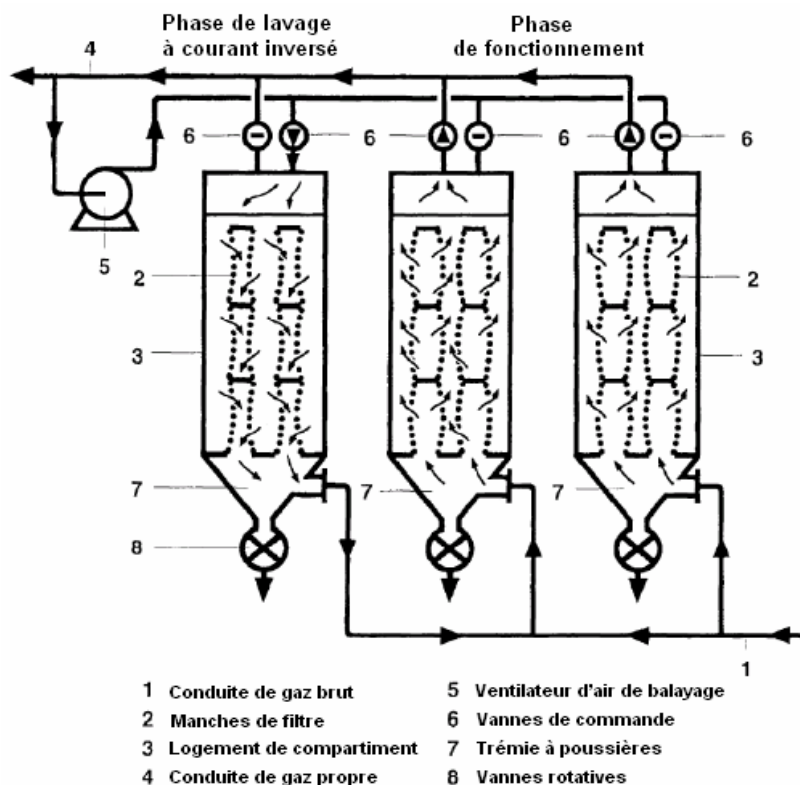


Figure 2.33 : Aménagement général d'un filtre à manches (avec un compartiment dans le cycle de traitement)

[tm 198, Lurgi 1999]

Le principe de base de la filtration par média filtrant est d'employer une membrane en tissu perméable au gaz mais qui va retenir la poussière. Les manches sont généralement fixés sur un cadre métallique et chaque manche comprend un moyen d'étanchéité dans la structure de son logement. Au départ, la

poussière est déposée à la fois sur les fibres de surface et dans la profondeur du tissu mais à mesure que la couche de surface se forme, elle constitue elle-même la couche filtrante principale. A mesure que le gâteau de poussière s'épaissit, la résistance au courant gazeux augmente. Un décolmatage régulier de la couche filtrante est par conséquent nécessaire pour contrôler la perte de charge du gaz à travers le filtre. La direction du flux gazeux à traiter peut être soit de l'intérieur de la manche vers l'extérieur soit de l'extérieur de la manche vers l'intérieur.

Les filtres à manches sont normalement classés en fonction de la méthode avec laquelle le média filtrant est traité. Une élimination régulière de la poussière déposée sur le tissu est importante pour garantir l'efficacité de filtration mais cela influence également la durée de vie du tissu.

Les méthodes de décolmatage les plus courantes sont le courant d'air à contre-courant, le secouage mécanique, les vibrations et l'air comprimé pulsé. Des pavillons acoustiques sont également employés pour décolmater les manches. Les mécanismes de décolmatage normaux ne rendent pas au tissu son état initial et les particules déposées dans la profondeur du tissu aident à réduire la taille des pores entre les fibres permettant ainsi d'atteindre de grandes efficacités de filtration pour les fumées submicroniques.

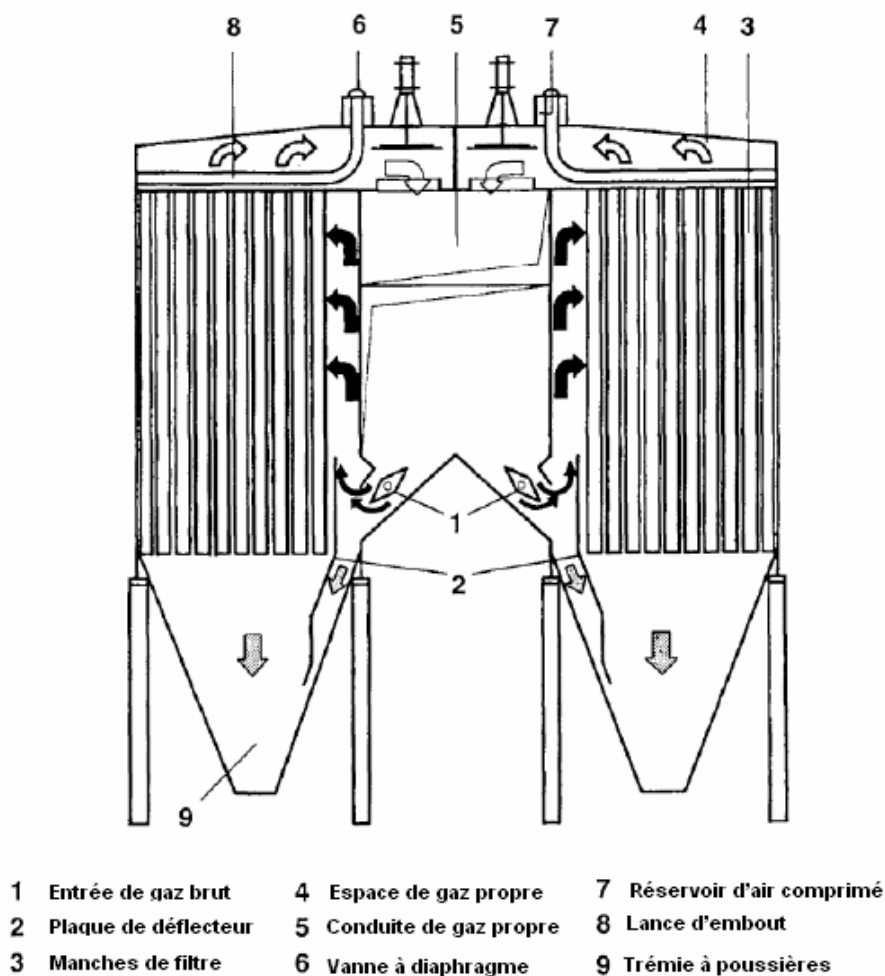


Figure 2.34 : Système de traitement à jet pulsé inverse

[tm 198, Lurgi 1999]

Les filtres à manches sont conçus sur la base de la vitesse de filtration anticipée définie comme la vitesse du gaz maximale acceptable circulant à travers une unité de surface de tissu ($\text{m}^3/\text{s} \div \text{m}^2$ – exprimée en m/s). Les vitesses de filtration se situent généralement dans la plage de 0,01 à 0,04 m/s en fonction de l'application, du type de filtre et du tissu.

Le choix du tissu tient compte de la composition des gaz, de la nature et de la granulométrie des poussières, de la méthode de décolmatage, de l'efficacité requise et des coûts. La température du gaz est également prise en compte ainsi que la méthode de refroidissement du gaz le cas échéant, la vapeur d'eau résultante et le point de rosée acide.

Les caractéristiques du tissu prises en compte sont sa résistance chimique, la forme des fibres et le type de fil, l'armure du matériau, la finition du matériau, sa résistance à l'abrasion et à la flexion, sa robustesse, son efficacité de filtration, la finition du tissu et sa perméabilité.

Le tableau suivant établit une comparaison des paramètres les plus couramment utilisés pour les différents systèmes de filtre [tm 144, Elkem 1998].

Paramètre	Filtre à jet pulsé	Filtre en fibre de verre à membrane	Filtre en fibre de verre
Rapport air-tissu	80-90 m/h	70-90 m/h	30-35 m/h
Température limite	200°C	280°C	280°C
Type de manche	Polyester/Nomex®	membrane en Gore-Tex®/fibre de verre	Fibre de verre
Dimensions de la manche	0,126 x 6 m	0,292 x 10 m	0,292 x 10 m
Surface de matériau par manche	2 m ²	9 m ²	9 m ²
Cage	Oui	Non	Non
Perte de charge	2 kPa	2 kPa	2,5 kPa
Durée de vie de la manche	Jusqu'à 30 mois	6 à 10 ans	6 à 10 ans

Tableau 2.9 : Comparaison entre les différents systèmes de filtres à manches

[tm 144, Elkem 1998]

L'usure des filtres à manches a pour conséquence une baisse graduelle de la performance qu'il est possible de mesurer. Un dommage ou une défaillance important(e) de plusieurs manches constitue un danger en cas de corrosion, si du matériau abrasif est filtré ou s'il y a un risque d'incendie. Les systèmes simples de surveillance en ligne tels que des indicateurs de pertes de charge ou des indicateurs de poussière ne fournissent qu'une indication grossière de la performance.

Des dispositifs triboélectriques ou optiques sont employés pour mesurer l'évolution des poussières émises par le filtre à manches afin de détecter les défaillances possibles et peuvent être employés pour détecter les pics de poussière pendant un cycle de décolmatage. Lorsque ces mesures sont intégrées dans un système de décolmatage en zones, la zone contenant des manches endommagées peut être identifiée et les réparations peuvent être effectuées localement [tm 126, Robson 1998]. La température est mesurée et des alarmes sont employées.

Il existe différentes conceptions de filtres à manche employant divers matériaux filtrants qui en principe atteignent tous des valeurs d'émission faibles, soit des émissions de poussière inférieures à 5 mg/ Nm³. L'utilisation de techniques de filtration à membrane (filtration de surface) augmente en outre la durée de vie de la manche, présente une limite de température élevée (jusqu'à 260 °C) et a des coûts de maintenance relativement bas. Les manches des filtres à membrane sont composées d'une membrane en PTFE expansé ultra-fine laminée sur du matériau de support. Les particules dans le flux gazeux sont captées sur la surface de la manche. Plutôt que de former un gâteau à l'intérieur ou de pénétrer dans le tissu de la manche, les particules sont repoussées de la membrane, formant ainsi un gâteau plus petit. Cette technique peut s'appliquer à toutes les installations nouvelles et existantes et peut également être employée pour remettre en état des filtres à manches existants [tm 144, Elkem, 1998].

Les tissus de filtre synthétiques comme le Gore-Tex® et le Tefaire® (Teflon/fibre de verre) ont permis d'utiliser les filtres à manches dans une large gamme d'applications et d'obtenir une durée de vie étendue. La performance des médias filtrants modernes à haute température ou en conditions abrasives

s'est améliorée récemment et les fabricants de tissu peuvent aider à définir les spécifications du média pour des applications précises. Avec une conception appropriée et les poussières adéquates, des émissions de poussières très faibles ($< 1 \text{ mg/ Nm}^3$) sont obtenues et une durée de vie et une fiabilité plus longues amortissent les coûts des tissus modernes.

Les filtres à manches dans certains procédés de ferroalliage emploient également des filtres à pression avec des ventilateurs du côté des gaz/fumées brutes. Récemment, un filtre à aspiration fermé avec des ventilateurs sur le côté des gaz propres a été développé. Cette technique est employée dans la plupart des autres secteurs des métaux et combine les avantages d'un traitement des manches en douceur, ce qui signifie une durée de vie plus longue, des coûts de fonctionnement et de maintenance faibles et grâce au filtre fermé, un volume de gaz défini [tm 144, Elkem, 1998].

2.8.1.1.5 Filtres céramiques et à maillage métallique

On trouve plusieurs exemples d'application appropriée de ces filtres dans ce secteur [tm 76, Scapa 1998] et des efficacités de filtration des poussières très élevées sont obtenues. De fines particules dont les PM10 sont éliminées.

Les filtres céramiques à faible densité fonctionnent de la même manière que les filtres à manches en termes de principes de fonctionnement, d'aménagement général et de décolmatage. Au lieu de manches à manches et de leurs supports métalliques, on emploie des éléments rigides qui ressemblent à des filtres à bougie. Ils possèdent un haut degré de résistance thermique et ce sont souvent les limites du logement qui déterminent la température de fonctionnement maximale. La dilatation du système de support lorsque la température augmente est également un facteur important car l'étanchéité des éléments filtrants à l'intérieur du logement peut être affectée, provoquant des fuites de l'écoulement de gaz « sales » dans le flux des gaz propres. Des systèmes de détection des défaillances en ligne sont employés comme pour les filtres à manches.

Les filtres céramiques sont fabriqués avec des aluminosilicates et peuvent recevoir un pré-revêtement avec différents matériaux pour améliorer leur résistance chimique ou aux acides. Les éléments filtrants sont relativement faciles à manipuler lorsqu'ils sont neufs mais deviennent fragiles après exposition à la chaleur et peuvent par conséquent se rompre durant la maintenance ou lors de manipulations brutales pour les décolmater.

La présence de poussières « collantes » constitue également un problème potentiel car elles risquent de ne pas être traitées de l'élément durant le cycle de décolmatage normal et peuvent provoquer une augmentation importante de la perte de charge. L'effet de la température sur l'efficacité de filtration est donc un facteur important dans la conception d'une installation. Avec une conception appropriée et des poussières adéquates, on obtient des émissions de poussières très faibles jusqu'à $0,1 \text{ mg/ Nm}^3$.

Une performance similaire à haute température a également été rapportée avec un filtre à maillage métallique re-conçu. Ce développement permet la création rapide d'une couche de gâteau de poussières après le traitement alors que la zone est « débranchée ».

2.8.1.1.6 Laveurs humides

La collecte des particules par le lavage liquide s'effectue par trois mécanismes principaux : l'impact, l'interception et la diffusion inertiels. La taille des particules à capter est un facteur important [tm 75, Theodore 1994; tm 223, VDI 3679 1998] et l'aptitude au mouillage du matériau à capter peut être également importante.

L'expérience montre que l'efficacité des laveurs humides dépend fortement de leur consommation totale d'énergie et notamment de la perte de charge à travers la zone de collecte. En outre, à condition que le liquide soit dispersé de manière égale dans le laveur, des pertes de charge similaires présenteront souvent des efficacités similaires sur la même poussière avec des conceptions de laveurs très différentes. Ainsi, il est impossible de concevoir un laveur humide haute efficacité sans une consommation d'énergie élevée sauf si les poussières concernées sont particulièrement facile à laver.

Différentes conceptions de laveurs haute énergie existent, basées sur des principes de courants radiaux, de pulvérisations, de diffuseurs et de cascades et les laveurs sont utilisés pour des poussières difficiles à retirer avec les autres techniques. En général, les gaz sont alors utilisés dans un autre procédé (par ex. comme gaz combustible) et ne sont pas émis. Ils sont également employés en liaison avec des filtres électrofiltres humides pour refroidir et nettoyer les gaz avant les unités d'acide sulfurique par procédé de contact et pour absorber les gaz acides. Cela est traité ultérieurement en 2.8.1.2.

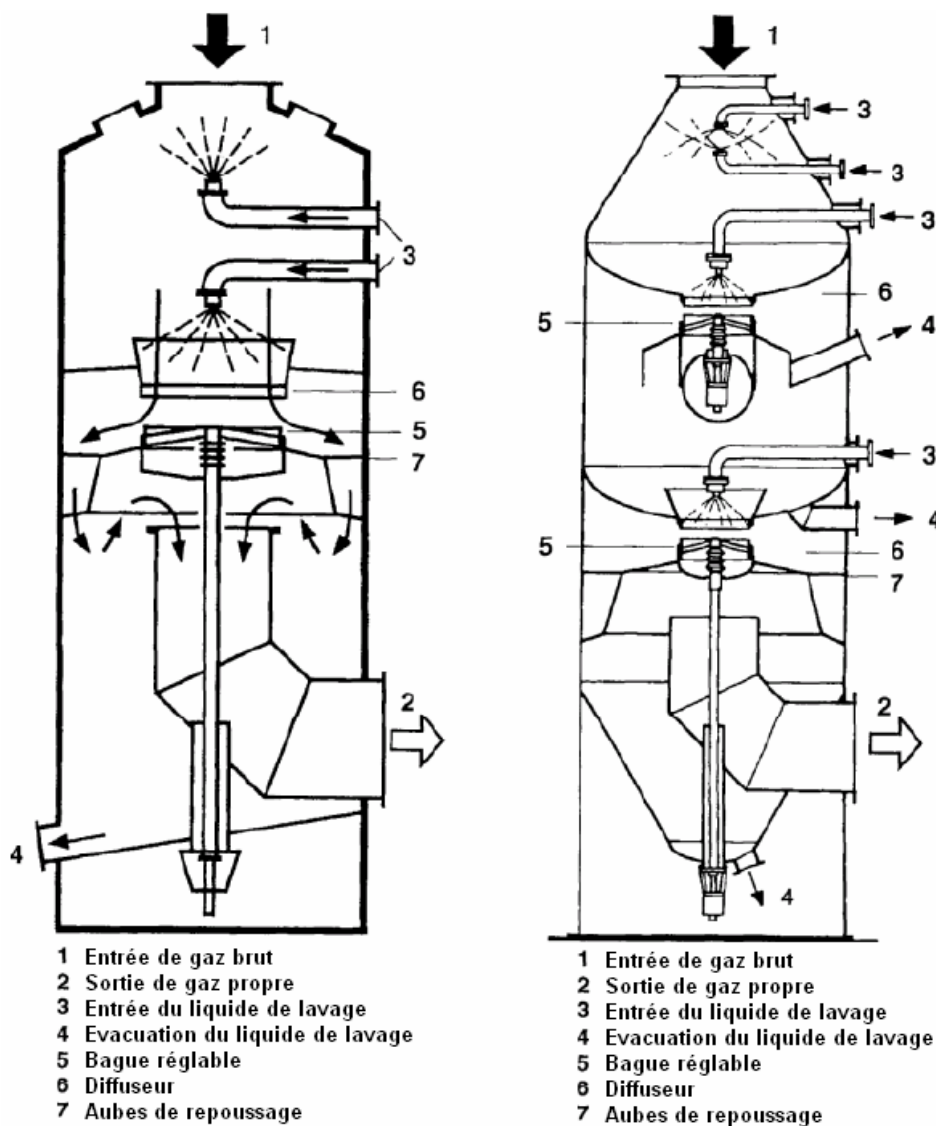


Figure 2.35 : Laveur à courant radial

[tm 198, Lurgi 1999]

Les laveurs humides à cascade sont souvent employés pour le dépoussiérage des effluents gazeux riches en CO provenant des fours à arc électrique étanches, le gaz est employé comme gaz à haute CV. Il est également employé pour traiter les gaz d'un appareil de frittage à convoyeur métallique, la poussière est très abrasive mais facilement mouillée et $< 4 \text{ mg/Nm}^3$ ont été obtenus. L'utilisation du laveur permet de refroidir le gaz en même temps que l'élimination des poussières. La durée de vie du filtre à manches peut être alors sérieusement limitée et une usure rapide du tissu peut conduire à une mauvaise performance.

2.8.1.1.7 Post-combustion et torchères

Les systèmes de combustion sont employés dans le secteur pour oxyder du CO, des particules ou des matières carbonées gazeuses dans un flux gazeux [tm 217, VDI 2442 1987; tm 218, VDI 2443 1995; tm 220, VDI 3476 1990]. Trois types sont utilisés :

- Des chambres de post-combustion à haute température où les gaz sont typiquement chauffés entre 850 C et 1000 C et maintenus pendant un minimum de 0,5 secondes (à condition qu'il n'y ait pas de composés chlorés) dont les résultats peuvent confirmer la destruction des COV présents. Les chambres de post-combustion emploient un système de brûleur (pas nécessairement employé en continu) et peuvent employer un système régénératif pour utiliser l'énergie thermique des composés gazeux et carbonés en utilisant des lits de support réfractaire. Un distributeur est nécessaire pour changer la direction du flux gazeux pour nettoyer le lit.
- Des incinérateurs catalytiques où la décomposition est réalisée sur une surface de catalyseur métallique à des températures inférieures, typiquement de 350 C à 400 C.
- Des torchères conçues pour brûler les déchets gazeux par ex. le CO en excès.

Les unités de post-combustion détruisent les composés organiques dont les dioxines par oxydation thermique et produisent de la poussière, du dioxyde de carbone, de l'eau, des oxydes de soufre et d'azote, et d'autres produits de combustion. Une dépollution supplémentaire est nécessaire pour éliminer ces produits.

Les chambres de post-combustion sont particulièrement utiles pour le déshuilage et l'élimination de revêtements qui peuvent produire une concentration importante de composés organiques. La présence de ces composés dans un four produit un grand volume de produits de combustion et résulterait en un temps de séjour très court dans le four et l'émission de gaz partiellement brûlés.

2.8.1.2 Systèmes de lavage des gaz

Des gaz tels que le NH₃, le SO₂, l'HF, l'HCl et le NO_x sont produits dans différents procédés, par exemple du dioxyde de soufre est produit durant la fusion et du fluorure d'hydrogène est produit durant l'électrolyse. Des techniques de prévention et de réduction sont disponibles pour ces gaz [tm 224, VDI 3927 1998]. La dépollution de ces gaz est souvent possible par la régulation de procédé ou en fixant le matériau dans du laitier ou de la matte. L'utilisation de brûleurs bas-NO_x et d'air de combustion étagé pour les fours et d'autres unités de combustion peut éviter la formation de ces gaz.

Les composés organiques et les dioxines et certains composés métalliques peuvent également être émis par certains procédés et peuvent adsorbés avec des techniques similaires.

Les techniques suivantes sont employées pour éliminer les composés gazeux. Des informations plus détaillées sont fournies dans les chapitres spécifiques aux métaux.

2.8.1.2.1 Laveur humide

Les systèmes de lavage humide servent dans le secteur à éliminer les composés gazeux à faibles concentrations, à éliminer les particules et également à contrôler la température (par refroidissement adiabatique). Alors que la technologie de base pour ces applications est similaire, les critères de conception pour l'élimination des particules et des composés gazeux sont très différents. Le lavage humide est souvent employé pour les trois procédés simultanément, ainsi la conception est inévitablement un compromis et des effets croisés importants tels que la production d'eaux usées supplémentaires peut en résulter en fonction de l'application. Certains procédés employés ailleurs dans le monde pour l'élimination du SO₂ ont un agent alcalin double et emploient la chaux comme second agent pour régénérer l'alcalin et éliminer le sulfate pour produire du gypse destiné à la vente.

Différents agents de lavage sont employés, allant de l'eau de mer à des solutions alcalines. L'application pour laquelle on emploie un laveur détermine les facteurs que l'on doit mesurer pour surveiller la performance. Les paramètres employés comprennent la perte de charge et le flux de solution, la température, la turbidité, la conductivité et le pH [tm 12, HMIP Zn 1993; tm 14 HMIP Pb 1993]. Des effets croisés significatifs potentiels existent et doivent être pris en compte au niveau local.

2.8.1.2.2 Laveurs secs et semi-secs

Des techniques d'adsorption comme le lavage sec sont employées pour absorber les gaz acides et les composés métalliques ou organiques. La chaux, l'hydroxyde de magnésium, la castine, l'oxyde de zinc et l'alumine sont couramment employés pour ces deux applications et des laveurs alcalins doubles sont employés ailleurs dans le monde. Du charbon actif (ou du coke) est utilisé pour retirer le métal (mercure) et les substances organiques pour lesquelles il est généralement plus efficace.

L'adsorption est réalisée à l'aide de tours à garnissage ou en injectant le réactif dans l'écoulement gazeux et à l'aide d'un réacteur. Les filtres à manches sont les plus couramment employés en aval pour capter l'agent de lavage qui a partiellement réagi et pour fournir une surface supplémentaire pour que l'absorption ait lieu. L'agent de lavage peut être recyclé plusieurs fois dans le circuit de lavage pour permettre une utilisation totale de la capacité d'absorption et d'adsorption. Dans le cas de l'alumine et de l'oxyde de zinc, ils sont utilisés ensuite dans le procédé principal. Les fluorures absorbés par l'alumine sont récupérés par le procédé d'électrolyse.

Une variante au lavage sec est le lavage semi-sec. Dans ce cas, un réactif en solution (généralement de la chaux) est injecté dans un réacteur dans le flux de gaz. L'eau est évaporée à condition que la température du gaz soit suffisamment élevée et que les composés gazeux réagissent avec les particules. Les particules du réactif qui a réagi sont ensuite retirées du flux gazeux. Le lavage sec est souvent moins efficace que le lavage humide ou semi-sec, notamment avec les gaz moins réactifs tel que le SO_2 . L'efficacité du réactif est souvent liée à la « réactivité » du réactif et les fournisseurs de chaux peuvent souvent produire des matières ayant une réactivité appropriée pour certaines applications.

Lorsque ces procédés sont employés pour retirer le SO_2 , ils sont connus comme étant la désulfuration des gaz émis (flue gas desulphuration - FGD). Ils sont employés pour réduire la teneur en SO_2 des gaz provenant des fours d'anode et d'autres sources émettant des faibles teneurs et pour laver les gaz de queue des gaz provenant d'une unité d'acide sulfurique. Du gypse est produit et est parfois destiné à la vente.

2.8.1.3 Systèmes de récupération des gaz

Outre l'utilisation de systèmes de lavage humide, sec et semi-sec pour éliminer les composés gazeux indiqués ci-dessus, ce secteur emploie de nombreux systèmes de récupération pour récupérer les gaz issus des gaz de procédé. L'HCl peut être absorbé dans de l'eau et le NO_x peut être absorbé dans de l'eau ou du peroxyde d'hydrogène.

Les exemples suivants sont employés dans le secteur pour boucler les cycles de matériau :

- a. Boucle d'acide chlorhydrique : - pour les procédés impliquant la dissolution, de l'acide chlorhydrique, HCl, est employé en combinaison avec un excès de chlore. Par l'évaporation et la collecte dans l'eau, on obtient un acide azéotropique (en concentrations d'environ 20% p/p). Celui-ci est réutilisé dans différentes parties du procédé.
- b. Boucle d'acide nitrique : - l'argent et le palladium sont souvent dissous dans de l'acide nitrique, du HNO_3 . Une quantité importante de l'oxyde d'azote (NO et NO_2) des gaz émis peut être captée avec l'oxygène ou du peroxyde d'hydrogène dans des laveurs à cascade spéciaux. On rencontre des problèmes dus à la longue durée nécessaire pour oxyder de petites quantités de NO et la réduction de l'absorption des gaz par des réactions exothermiques. C'est pourquoi le refroidissement et plusieurs laveurs combinés sont nécessaires pour atteindre les valeurs limites, en évitant les

fumées rousses s'échappant de la cheminée. L'acide nitrique produit par le premier laveur a généralement des concentrations d'environ 45% en poids et peut être réemployé dans plusieurs procédés.

- c. Boucle de chlore : - le chlore est utilisé dans les procédés humides pour dissoudre les métaux et dans les phases de chloruration par voie sèche à des températures élevées pour les affiner. Dans les deux cas, on emploie des systèmes fermés, par ex. des tubes en U avec de l'eau et des cellules électrolytiques étanches. Le gaz chlore peut être récupéré ou des solutions d'hypochlorite produites. L'hypochlorite est aussi utilisé comme agent oxydant dans les solutions de lavage pour différents procédés d'affinage.
- d. Boucle de chlorure d'ammonium : - la solubilité relativement faible du chlorure d'ammonium, le NH_4Cl , dans des solutions évaporées à température ambiante permet de réutiliser les précipités cristallins de ce sel.

2.8.1.4 Captage du soufre

Le soufre présent dans les matières premières peut être incorporé dans des laitiers ou des mattes à l'aide de réactifs appropriés, les mattes peuvent être utilisées dans les procédés. Le soufre qui n'est pas capté dans la matte ou le laitier d'un procédé de fusion est généralement présent comme SO_2 et peut être récupéré comme élément soufre, SO_2 liquide, gypse ou acide sulfurique. La présence de marchés pour ces produits influence le choix du produit final mais l'option la plus sûre au niveau environnemental est de produire du gypse ou du soufre élémentaire en l'absence de débouchés fiables pour d'autres produits. Le dioxyde de soufre est produit par le grillage et la fusion de concentrés sulfurés et les procédés de conversion associés. Ces procédés fonctionnent de manière à ce que la concentration maximale de dioxyde de soufre soit produite pour augmenter l'efficacité de récupération du soufre. La récupération du soufre élimine les effets croisés.

Les techniques suivantes sont disponibles pour la récupération du soufre [tm 24, DFIU Sulphur 1996] :

a. Gaz contenant jusqu'à 1% de dioxyde de soufre.

Le procédé régénérable Wellman-Lord implique la réaction des gaz faibles avec le sulfite de sodium et l'eau pour produire du bisulfite de sodium. Du dioxyde de soufre concentré peut être extrait de cette solution, du dioxyde de soufre liquide peut être produit ou d'autres produits peuvent être fabriqués comme le soufre.

Le lavage à 2,3-diméthylaniline (DMA) (procédé Asarco) peut absorber le dioxyde de soufre qui est alors éliminé par réaction avec de l'eau pour produire de l'acide sulfurique ou du dioxyde de soufre liquide.

Le procédé Peracidox, l'oxydation avec du peroxyde d'hydrogène pour produire de l'acide sulfurique.

Le procédé par sulfacides, l'oxydation avec un catalyseur au charbon actif pour produire de l'acide sulfurique.

La désulfurisation des gaz émis (FGD) dans un laveur sec ou semi-sec à l'aide de chaux pour produire du gypse. Ce système est largement utilisé dans les usines de production d'électricité.

Un lavage à double alcalin avec absorption par soude caustique et précipitation du gypse.

Absorption par l'alumine et précipitation du gypse (procédé Dowa).

Précipitation par sulfate de magnésium.

a. Gaz avec des concentrations de dioxyde de soufre supérieures.

i) Absorption du dioxyde de soufre dans de l'eau froide (par ex. eau de mer froide) suivie d'un lavage sous vide et de la récupération comme dioxyde de soufre liquide. Ces procédés sont employés conjointement avec une unité d'acide sulfurique pour récupérer le dioxyde de soufre non dissous. Le potentiel de production du dioxyde de soufre liquide dépend de l'existence d'un marché local.

ii) Production d'acide sulfurique. La production d'acide sulfurique en brûlant du soufre pour produire du dioxyde de soufre est un procédé chimique bien établi. Ces installations bénéficient d'une concentration élevée constante du gaz et les limites de procédé sont donc moindres. Les gaz provenant d'un four de grillage ou d'un four de fusion ne présentent pas ces caractéristiques et sont par conséquent plus difficiles à utiliser et peuvent ne pas atteindre le même niveau de conversion.

Les gaz du four de fusion provenant du four sont traités et refroidis et peuvent être séchés. Le dioxyde de soufre présent dans le gaz est ensuite converti en trioxyde de soufre dans un « procédé de contact » où les gaz passent à travers un lit de catalyseur au pentaoxyde de vanadium. Parfois, de l'oxyde de césium est ajouté au catalyseur ce qui peut augmenter la performance notamment lorsque la concentration de SO_2 est faible et variable ou lorsque la température est basse. Des catalyseurs améliorés sont employés pour augmenter la capacité de conversion dans des procédés de contact à simple et double absorption.

Dans une **installation de contact à simple absorption**, les gaz passent à travers une série de quatre lits de catalyseur ou plus afin d'obtenir une efficacité de conversion élevée. La production de trioxyde de soufre est exotherme et si la teneur en dioxyde de soufre est suffisamment élevée pour générer suffisamment de chaleur, les gaz sont refroidis entre chaque étage. Pour les gaz ayant une teneur en dioxyde de soufre faible, un ajout de chaleur peut être nécessaire entre les étages. Le trioxyde de soufre formé est alors absorbé dans de l'acide sulfurique à 98% qui est ensuite dilué pour produire de l'acide sulfurique. Le procédé WSA est un développement du procédé de contact à simple absorption.

La présence de trioxyde de soufre inhibe la conversion du dioxyde de soufre et un **procédé de contact à double absorption** est par conséquent le plus couramment utilisé pour obtenir une conversion du dioxyde de soufre plus efficace lorsque la teneur en dioxyde de soufre du gaz est suffisamment élevée. Dans ce cas, le trioxyde de soufre est absorbé après la deuxième ou le troisième étage, permettant ainsi la conversion de plus de dioxyde de soufre dans les étages suivants. Il s'ensuit une phase ultérieure d'absorption du trioxyde de soufre. L'utilisation d'une installation de contact à double absorption augmente l'efficacité d'élimination du dioxyde de soufre de $< 98\%$ à $> 99,5\%$. Il a également été déclaré que l'utilisation d'un catalyseur enrichi en césium peut augmenter cela à 99,9% mais ces données se réfèrent à un procédé possédant une concentration élevée et constante de dioxyde de soufre dans le gaz entrant [tm 140, Finland Cu 1999].

L'élimination des poussières avant le procédé de contact est essentiel pour protéger le catalyseur et produire un acide pur. Cela réduit la concentration de la plupart des métaux, par exemple le zinc, à des niveaux acceptables dans l'acide produit et évite l'empoisonnement du catalyseur. Le prétraitement des gaz comprend généralement plusieurs phases en fonction des contaminants présents dans les gaz. Ces phases peuvent comprendre le refroidissement avec récupération de chaleur, un électrofiltre haute température, le lavage pour retirer le mercure etc. et un électrofiltre humide.

L'acide faible généré dans la section de lavage du gaz contient généralement 1 - 50% de H_2SO_4 . Des halogénures seront présents sous forme d' HCl (10 – 1000 ppm) et d' HF (10 - 1000 ppm dont H_2SiF_6). L'acide peut également contenir des métaux tels que le cuivre, le zinc et le fer (individuellement jusqu'à 2500 ppm), le mercure (jusqu'à 1900 ppm) et le plomb (jusqu'à 50 ppm). De l'arsenic peut être présent à des niveaux pouvant atteindre 10 000 ppm. D'autres éléments tels que l'aluminium, le nickel, le chrome, le cadmium, le bismuth, l'antimoine, etc. peuvent également être présents en fonction des contaminants présents dans la charge du four de fusion. L'acide faible sera également saturé avec du SO_2 (typiquement entre 2000 et 5000 ppm selon la force du SO_2). L'acide peut être décomposé et les gaz passés dans l'unité de production d'acide, être traités et éliminés ou utilisés par ex. si un procédé de lixiviation est à proximité.

Tout NO_x présent dans les gaz traités dans l'unité de fabrication d'acide sulfurique est absorbé dans l'acide qui est produit. Si les concentrations sont élevées, un acide brun est alors produit et cela peut ne pas être acceptable pour les clients potentiels. Par conséquent, le problème est le potentiel de vente.

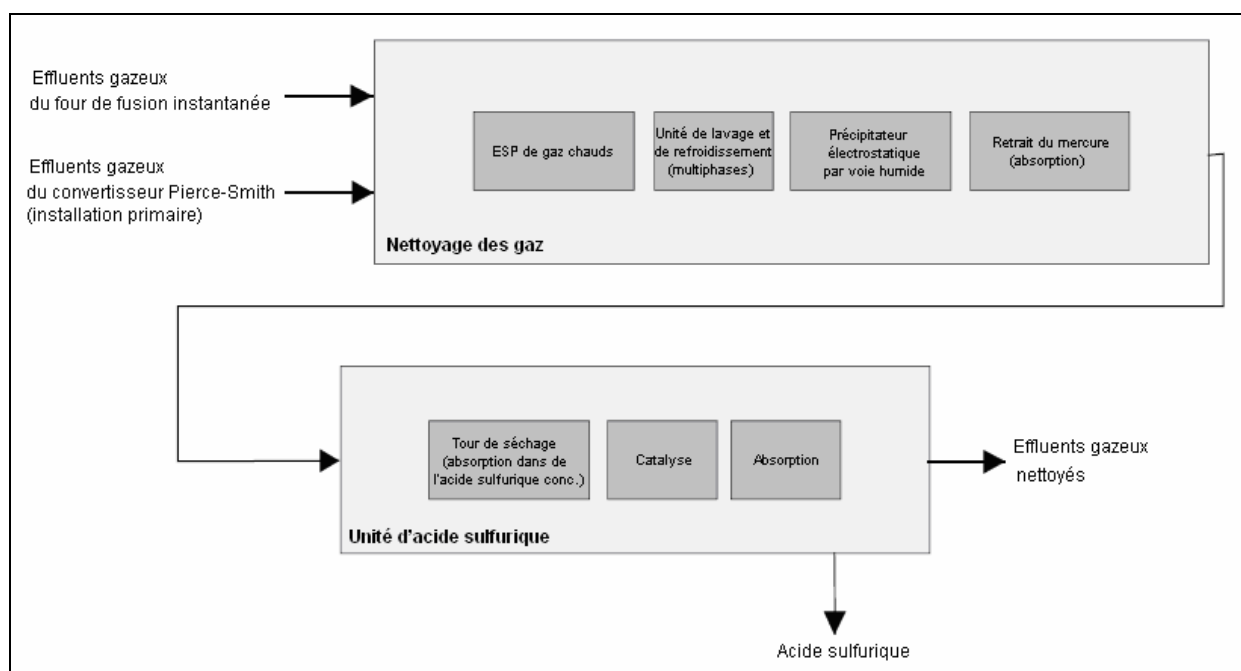


Figure 2.36 : Train épurateur de gaz type pour une unité d'acide sulfurique [FIGURE : ESP de gaz chaud → électrofiltre haute température] [retrait du mercure → élimination du mercure] [précipitateur électrostatique par voie humide → électrofiltre humide] [nettoyage des gaz → traitement des gaz]

Le procédé de production d'acide sulfurique retient tout métal et poussières résiduel(les) qui sont alors transférés à l'acide qui est produit. L'élimination des poussières et des métaux avant le procédé de contact signifie que ce ne sont pas des composés importants dans les gaz émis à l'atmosphère. Des brouillards d'acide peuvent être émis à la cheminée et des filtres à bougies sont utilisés lorsque cela est nécessaire pour éliminer ces brouillards. Il a été rapporté que des niveaux de fluorure élevés dans le gaz augmentent la probabilité de produire des brouillards d'acide [tm 106, Farrell 1998]

Les unités d'acide sulfurique sont utilisées pour retirer le dioxyde de soufre produit durant le frittage, le grillage et la fusion d'une large gamme de minerais et concentrés sulfurés. Les métaux produits sont le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc et différents flux de métaux mélangés.

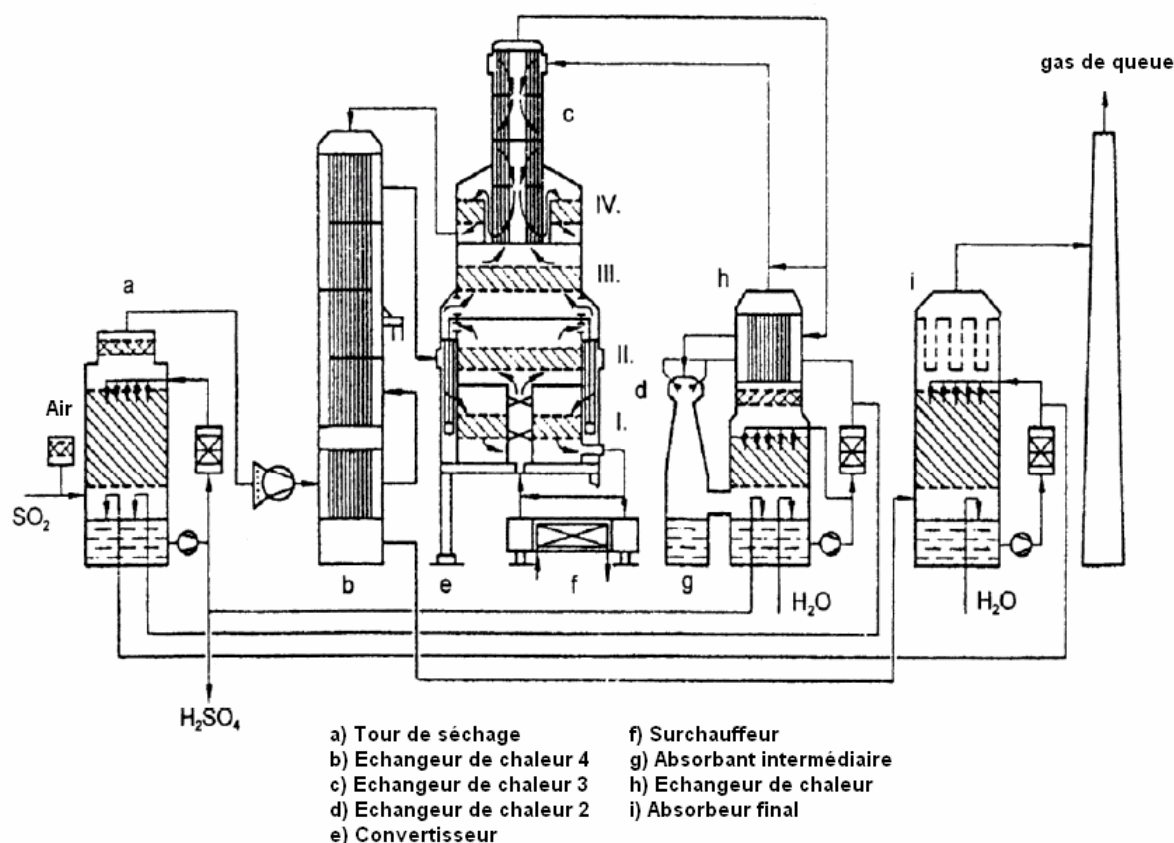


Figure 2.37 : Unité Type de fabrication d'Acide Sulfurique par le procédé de contact à double absorption

2.8.1.5 Carbone total et COV

Le carbone total et les COV sont produits par une mauvaise combustion et durant différentes opérations comme le dégraissage des composants, les procédés d'extraction par solvants et par la « respiration » des cuves employées pour stocker les solvants et le combustible. Les solvants peuvent être aromatiques, aliphatiques, chlorés, organiques ou à base d'eau, leur éco-toxicité varie et cela est pris en compte pour utiliser le solvant le plus inoffensif et pour déterminer le système de dépollution utilisé sur un site donné. Le confinement est pratiqué pour éviter les émissions de solvants et des mélangeurs/cuves de décantation sont employés pour réduire au minimum le contact avec l'air. Les vapeurs de solvants ou de combustibles doivent être extraites et éliminées des gaz émis.

Les techniques employées pour retirer ou détruire les COV sont les chambres de post-combustion et les laveurs décrits ci-dessus et il est possible d'obtenir des concentrations $< 10\text{mg}/\text{Nm}^3$. On emploie également des bio-filtres et des réacteurs [tm 159, VDI 1996]. Des pièges à charbon actif ainsi que des systèmes de groupes frigorifiques/condenseurs sont employés et permettent de récupérer les substances pour réutilisation. Dans un procédé d'extraction de solvants, l'air de ventilation est refroidi et élimine le solvant jusqu'à un niveau de 0,2 kg par tonne de cobalt produite. Des COV peuvent également être libérés durant la fourniture de solvants, etc. Une reventilation des gaz déplacés sert à minimiser l'émission de COV.

2.8.1.6 Dioxines

Les dioxines concernent la production de métaux [tm 225, VDI 3460 1997], notamment de la production à partir de matières premières secondaires ou des procédés nécessitant une chloruration comme la production électrolytique de magnésium à partir de l'eau de mer et de la dolomite. Les dioxines ou leurs précurseurs peuvent être présents dans certaines matières premières et il y a risque de synthèse de-novo dans les fours ou les systèmes de dépollution. Les dioxines sont facilement

adsorbées sur de la matière solide et peuvent être captées par des média environnementaux comme des poussières, des filtres solides et des poussières sous filtre.

Ce secteur repose sur des sources de matières premières secondaires provenant de l'industrie des déchets. Bien qu'il existe des nuances de déchets agréées, les impuretés présentes peuvent conduire à la formation de dioxines pendant la combustion incomplète ou par synthèse de-novo. La présence de dioxines dans les poussières d'EAF et la présence de biphenyles polychlorés dans les déchets de transformateur constituent des sources potentielles directes de dioxines.

La présence d'huile et d'autres matières organiques sur les déchets ou d'autres sources de carbone (combustibles partiellement brûlés et réducteurs, tel que le coke), peut produire de fines particules de carbone qui réagissent avec des chlorures minéraux ou du chlore organique dans la plage de températures de 250 à 500 °C et produisent des dioxines. Ce procédé est connu sous le nom de synthèse de novo et est catalysé en présence de métaux comme le cuivre ou le fer. La pré-sélection ou le traitement de la charge pour minimiser la quantité de précurseurs ou de matières organiques constitue par conséquent une mesure très importante pour éviter la formation de dioxines.

Bien que les dioxines soient détruites à haute température (supérieures à 850 °C), en présence d'oxygène, le procédé de synthèse de novo est toujours possible lorsque les gaz sont refroidis dans la « fenêtre de reformation ». Cette fenêtre peut être présente dans les systèmes de dépollution et dans les parties froides du four par ex. la zone de chargement. Le soin apporté à la conception des systèmes de refroidissement afin de réduire au minimum le temps de séjour dans la fenêtre est pratiqué également pour éviter la synthèse de novo. De l'oxygène en quantité suffisante est nécessaire dans les gaz chauds et l'injection d'oxygène peut être employée pour garantir une combustion complète.

Du charbon actif peut être injecté dans les gaz où les dioxines sont absorbées à la surface. Une filtration des poussières à haute efficacité permet ensuite de retirer les poussières et les dioxines. Les dioxines peuvent aussi être absorbées sur d'autres particules et peuvent être éliminées à l'aide d'une filtration des poussières à haute efficacité. Les poussières captées peuvent avoir des concentrations de dioxines élevées et peuvent nécessiter une mise en décharge ou un traitement précis. Des systèmes d'oxydation catalytique sont également disponibles pour détruire les dioxines et il a été rapporté que des filtres à manches qui comportent une couche catalytique sont employés.

Tout ceci doit être considéré comme des techniques à envisager en fonction de l'application ; elles peuvent toutes être intégrées dans des procédés existants. La technique la plus efficace et économiquement viable dépendra du site spécifique, des aspects relatifs à la sécurité et de la stabilité opérationnelle ainsi que des facteurs économiques également pris en compte. Des niveaux d'émission plus satisfaisants que 0,5 ng par mètre cube de TEQ peuvent être atteints avec une ou plusieurs de ces techniques au niveau du gaz épuré. Des valeurs inférieures, plus satisfaisantes que 0,1 ng par mètre cube de TEQ peuvent être atteintes avec une ou une combinaison de ces techniques.

2.8.1.7 Elimination des autres impuretés

Outre leur interférence avec la récupération de l'acide sulfurique et du dioxyde de soufre, d'autres métaux non-ferreux présents dans les minerais et concentrés ont un impact environnemental négatif. Ils doivent être éliminés si cela n'a pas déjà été fait. Ils ont également une valeur et ainsi ils sont récupérés séparément du métal ayant le plus grand intérêt. Des phases de purification sont par conséquent employées pour les extraire et les récupérer et celles-ci figurent dans les chapitres spécifiques aux métaux.

2.8.1.7.1 Métaux non-ferreux

Les procédés pyrométallurgiques sont employés pour retirer les impuretés du métal désiré en volatilisant et/ou en formant des scories d'autres métaux. Par exemple, le Zn, le Bi, le Pb, le Sn, le Cd, l'As et le Ga peuvent être volatilisés dans les conditions d'exploitation du four et sont vaporisés lors de la fusion. Le choix de la température de fonctionnement influence cette phase du procédé et ces oxydes métalliques peuvent être captés à l'aide d'une technique d'élimination des poussières

appropriée. Les métaux sont ensuite récupérés des poussières captées par différentes manières. Les fours de traitement du laitier et les procédés de vaporisation du laitier sont également utilisés pour retirer les métaux volatils des poussières captées à partir des fumées. Ces poussières et autres résidus forment par conséquent les matières premières de nombreux métaux.

Des métaux volatils et leurs oxydes sont également présents dans les poussières et les résidus d'autres procédés, par exemple des poussières issues de la fabrication de l'acier. Ces résidus constituent les matières premières des autres procédés pour récupérer le zinc et d'autres métaux volatils. Dans ces procédés, un four rotatif (four Waelz) ou un four ISA Smelt est employé pour la volatilisation du métal et enrichir un mélange d'oxydes en zinc et en plomb qui peut alors être récupéré dans d'autres procédés pyrométallurgiques.

Les cuves et autres équipements utilisés dans les installations hydro-métallurgiques sont pour la plupart ventilés vers l'atmosphère afin de garantir la sécurité d'un lieu de travail. Cet air de ventilation peut contenir un brouillard acide contenant des composés métalliques provenant de la solution. Les techniques d'élimination comprennent les laveurs humides ou des dévésiculeurs. Les éléments du dévésiculeur sont placés dans le flux gazeux dans la cheminée ou sur la partie haute des tours de refroidissement et la solution séparée retourne vers le réservoir principal.

2.8.1.7.2 Mercure

Le mercure est volatil aux températures rencontrées dans la plupart des procédés de dépollution et d'autres techniques peuvent être nécessaires pour l'éliminer [tm 26, PARCOM 1996; tm 139, Finland Zn 1999; tm 225, VDI 3460 1997]. Dans le cas de l'élimination du mercure avant une unité de fabrication d'acide sulfurique, tout mercure résiduel sera présent dans l'acide produit, la spécification produit est normalement de $< 0,1$ ppm et équivalente à $\sim 0,02$ mg/Nm³ dans le gaz propre et tous les procédés déclarent atteindre ces valeurs.

- Procédé Boliden/Norzink. Ce procédé est basé sur un laveur humide employant la réaction entre le chlorure mercurique et le mercure pour former du chlorure mercurique (calomel), qui précipite dans la solution. Ce procédé est placé après la phase de lavage et de refroidissement dans l'unité de fabrication d'acide, ainsi le gaz est exempt de poussière et de SO₃ et la température est d'environ 30°C. Le gaz est lavé dans une tour à lit à garnissage avec une solution contenant de l'HgCl₂. Il se produit une réaction avec le mercure métallique du gaz et une précipitation de calomel, Hg₂Cl₂. Le calomel est extrait de la solution de lavage en circulation et partiellement régénéré par du gaz chlore en HgCl₂ qui est alors recyclé vers la phase de lavage. La purge est soit utilisée pour la production de mercure soit stocké. Le chlorure mercurique est un composé très toxique du mercure et ce procédé est exploité avec la plus grande précaution.
- Procédé Bolchem. Cette phase de procédé est placée dans l'unité de fabrication d'acide comme dans le procédé Boliden-Norzink mais l'élimination est effectuée avec de l'acide sulfurique à 99%. Cet acide provient de la partie d'absorption de l'unité de fabrication d'acide et il oxyde le mercure à température ambiante. Le mercure contenant de l'acide qui en résulte est dilué à 80% et le mercure est précipité comme sulfure avec du thiosulfate. Après filtration du sulfure mercurique, l'acide est renvoyé à l'absorption. Par conséquent, aucun acide n'est consommé dans le procédé.
- Procédé Outokumpu. Dans ce procédé, le mercure est extrait avant la phase de lavage dans l'unité de fabrication d'acide. Le gaz qui est environ à 350°C est dirigé à travers une tour à lit à garnissage où il est lavé à contre-courant avec un acide sulfurique à environ 90% à près de 190°C. L'acide est formé in situ à partir du SO₃ du gaz. Le mercure est précipité comme composé de sélénium-chlorure. La boue de mercure est retirée de l'acide refroidi, filtrée et lavée, puis elle est envoyée à la production de mercure métallique. Une partie de l'acide est alors recyclée vers la phase de lavage.
- Procédé au thiocyanate de sodium. Ce procédé est utilisé sur un four de grillage de zinc. Le gaz SO₂ est lavé avec une solution de thiocyanate de sodium et l'Hg est extrait comme sulfure. Le thiocyanate de sodium est régénéré.

- $3\text{Hg} + 8\text{SCN}^- + 4\text{H}^+ + \text{SO}_2 \Rightarrow 2[\text{Hg}(\text{SCN})_4]^{2-} + \text{HgS} + 2\text{H}_2\text{O}$
- Filtre à charbon actif. Un filtre d'adsorption utilisant du charbon actif est employé pour retirer la vapeur de mercure du flux gazeux.

Deux procédés permettent de réduire la teneur en mercure dans l'acide sulfurique produit pendant la production de métaux non-ferreux.

- Procédé d'échange d'ions Superlig. Ce procédé utilise l'échange d'ions pour retirer le mercure du produit acide et obtient une concentration en mercure $< 0,5$ ppm.
- Du iodure de potassium est ajouté à l'acide qui doit au moins avoir une force de 93%, à une température d'environ 0°C . L'iodure de mercure, HgI_2 , est alors précipité.

Les procédés Norzink et Outokumpu sont les plus couramment utilisés mais d'autres procédés ont été reportés par ailleurs [tm 26, PARCOM 1996] :

- Laveur au sélénium. Ce procédé est également basé sur un laveur humide et emploie la réaction entre le sélénium amorphe dans l'acide sulfurique et le mercure pour éliminer des concentrations élevées de vapeur de mercure :
- Filtre à sélénium. Procédé de lavage sec qui emploie du sélénium amorphe pour réagir avec la vapeur de mercure pour former du séléniure de mercure :
- Procédé par sulfure de plomb. Procédé de lavage sec utilisant des nodules de sulfure de plomb car cet agent élimine le mercure du flux gazeux.

2.8.1.8 Utilisation de l'enrichissement à l'oxygène dans les systèmes de combustion

Les systèmes de combustion/d'oxydation employés dans la production des métaux non-ferreux emploient souvent l'oxygène directement ou l'enrichissement à l'oxygène de l'air ou dans le corps du four. L'enrichissement permet l'oxydation auto-thermique des minerais à base de sulfure, augmente la capacité ou le taux de fusion de fours spécifiques et fournit des zones distinctes riches en oxygène dans un four afin de permettre la combustion complète séparément d'une zone de réduction.

L'oxygène permet d'obtenir les améliorations suivantes [tm 125, ETSU 1994] : -

- L'augmentation de la chaleur libérée dans le corps du four permettant une augmentation de la capacité ou du taux de fusion. La capacité à faire fonctionner certains procédés de manière auto-thermique et à varier l'étendue de l'enrichissement à l'oxygène « en ligne » pour réguler le procédé métallurgique et éviter les émissions.
- Une réduction significative du volume des gaz de procédé produit lorsque la teneur en azote est réduite. Cela permet de réduire de manière significative la taille des conduits en aval et des systèmes de dépollution et évite la perte d'énergie due au chauffage de l'azote.
- Une augmentation de la concentration de dioxyde de soufre (ou d'autres produits) dans les gaz de procédé rendant les procédés de conversion et de récupération plus efficaces sans utiliser de catalyseurs spéciaux.
- L'emploi de l'oxygène pur dans un brûleur entraîne une réduction de la pression partielle de l'azote dans la flamme et par conséquent la formation de NO_x thermiques peut être réduite. Cela peut ne pas être le cas avec l'enrichissement à l'oxygène dans ou à proximité du brûleur car la température du gaz plus élevée peut activer la formation des NO_x thermiques. Dans ce dernier cas, de l'oxygène peut être ajouté en aval du brûleur pour réduire cet effet et maintenir l'amélioration du taux de fusion.
- La production d'oxygène sur site est liée à la production du gaz d'azote par séparation de l'air [tm 127, ETSU 1994]. Cela est parfois employé pour les besoins en gaz inerte sur site. Les gaz inertes sont employés pour les systèmes de dépollution lorsque des matériaux pyrophores sont présents (par ex. concentrés de Cu secs) ou pour le dégazage du métal fondu, pour les zones de

refroidissement du laitier et des scories et pour le contrôle des fumées provenant des opérations de coulée et de versement.

- L'injection d'oxygène sur des points distincts dans un four en aval du brûleur principal permet de contrôler les conditions de température et d'oxydation de manière isolée de l'exploitation principale du four. Cela permet d'augmenter le taux de fusion sans augmentation inacceptable de la température. Un exemple est la fourniture d'une zone de post-combustion intégrale dans un haut fourneau.

2.8.1.9 Techniques de régulation des procédés pour les équipements de captage et de dépollution

L'opération et la régulation du procédé sont réalisées de manière extensive dans ce secteur. Les techniques suivantes sont employées :

- Les systèmes de dosage des réactifs sont énormément utilisés.
- La régulation par microprocesseur de la charge en réactif et de la performance de l'installation. La régulation en ligne de la température, de la perte de charge, des particules ou autres polluants émis, du courant et de la tension de l'électrofiltre et du débit de la solution du laveur ainsi que du pH. Des alarmes sont prévues pour signaler les problèmes de fonctionnement.
- Les opérateurs sont formés et évalués quant à l'utilisation des instructions de fonctionnement et l'utilisation des techniques modernes décrites.
- L'optimisation des niveaux de supervision permet de tirer le meilleur profit de ces dispositions et de maintenir la responsabilité des opérateurs.
- Des systèmes de gestion environnementale et de la qualité sont employés.
- Des systèmes de maintenance robustes sont utilisés. On assiste à un recours croissant au personnel de maintenance dédié faisant partie des équipes d'opérateurs et venant renforcer les équipes de maintenance dédiées.

2.8.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les principales données relatives aux émissions et à la consommation pour l'HF, l'HCl, les COV, les dioxines, le NO_x et le CO figurent dans les chapitres spécifiques aux métaux mais les émissions atteintes sont listées dans le tableau ci-dessous pour certains exemples de dépollution et de traitement.

Technique	Taille de particule um.	% d'efficacité de collecte à 1 µm	Température de fonctionnement maximale en °C	Plages d'émissions pouvant être atteintes	Commentaires
Electrofiltre haute température	< 0,1	> 99 en fonction de la conception	450	< 5 – 15 (pré dépollution > 50)	4 ou 5 champs L'application habituelle est la pré- dépollution
Electrofiltre humide	0,01	< 99	80	< 1 – 5 Optiquement clair	Filtre électrostatique avec 2 champs en série. Principalement pour la précipitation de brouillard
Cyclone	10	40	1100	100-300	Particules de grosse taille. Utilisé pour faciliter d'autres méthodes.
Filtre à	0,01	> 99,5	220	< 1 – 5	Bonne performance avec

manches					un type de poussière approprié.
Filtre céramique	0,001	99,5	900	0,1 - 1	Excellente performance avec un type de poussière approprié.
Laveur humide	1 - 3	> 80 - 99	Entrée 1000 Sortie 80	< 4 - 50	Bonne performance avec un type de poussière approprié. Réduction des gaz acides.

Tableau 2.10 : Exemple d'émissions actuelles pour certaines applications de dépolluérage (poussière mg/Nm³)

Substance	Unité	Valeur mesurée
SO _x (comme SO ₂)	mg/Nm ³	100 – 1100
SO ₃	mg/Nm ³	20 – 40
NO _x (NO ₂)	mg/Nm ³	20 – 45
Cl ⁻ (comme HCl)	mg/Nm ³	2 – 7
F ⁻ (comme HF)	mg/Nm ³	1 – 4
Cd	mg/Nm ³	0,001 – 0,02
Hg	mg/Nm ³	0,001 – 0,07
Tl	mg/Nm ³	0,001 – 0,02
As	mg/Nm ³	< 0,01 – 0,02
Se	mg/Nm ³	< 0,01 – 0,02
Sb	mg/Nm ³	< 0,01 – 0,5
Pb	mg/Nm ³	< 0,01 – 0,5
Cu	mg/Nm ³	< 0,01 – 0,5
PCDD/PCDF	ng TEQ/m3	0,001 – 0,01
Gaz issus du four flash et du convertisseur Pierce-Smith 290000 Nm ³ /h Entrée SO ₂ 6 – 8,4% conversion > à 99,6 %, produisant 2000 t/j d'acide		

Tableau 2.11 : Exemple des concentrations des principaux constituants du gaz propre provenant d'une unité de fabrication d'acide sulfurique

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Méthode	SO ₂ en entrée en %	SO ₂ en sortie en mg/Nm ³	Notes
Contact à double absorption – 4ème étage	> 5%	450	conversion >99,5%
Contact à simple absorption – dopage en Cs ₂ O au dernier étage	< 3%	750	conversion >99% SO ₂ en entrée variable/faible
Contact à simple absorption – dopage en Cs ₂ O + condenseur WSA	< 3%	850 (300 ppm)	conversion >99%
Contact à double absorption – 5ème étage	15%	500 - 1000	conversion >99,8% de SO ₂ en entrée très élevé
Contact à double absorption – 5ème étage, dopage en Cs ₂ O du catalyseur, gaz d'entrée à teneur élevée en O ₂	14%	< 285 (100 ppm)	conversion >99,9 SO ₂ en entrée très élevé et constant

Tableau 2.12 : Exemple de la performance de certaines unités de fabrication d'acide sulfurique existantes

2.8.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des techniques permettant de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de bonnes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC.

2.8.3.1 Principes généraux

Le choix et la conception d'une technique de dépollution adaptée sont particulièrement importants. Différentes techniques existent et bien que certaines semblent offrir une performance très élevée, des problèmes peuvent survenir si les caractéristiques telles que la charge et la nature des gaz, des poussières et d'autres composés n'ont pas été pris en compte en totalité. Par exemple, le filtre à manches utilisant des média filtrants modernes est considéré comme offrant une meilleure performance environnementale que les autres techniques pour éliminer les poussières, toutefois il ne peut être considéré comme pouvant s'appliquer de manière universelle en raison des problèmes causés par certains types de poussières collantes ou abrasives. Ces questions sont spécifiques aux sites et matériaux individuels et l'opérateur doit tenir compte de ces facteurs dans des instructions de conception professionnelles.

Le volume, la pression, la température et la teneur en humidité du gaz sont des paramètres importants ayant une influence majeure sur les techniques ou la combinaison de techniques employées. Le point de rosée sera notamment affecté par tous ces paramètres et leurs variations au long d'un cycle de production doivent être pris en compte.

La caractérisation de la nature des poussières ou des fumées est très importante pour identifier les propriétés inhabituelles (hygroscopique, pyrophore, collante, abrasive etc.). La taille et la forme des particules, la mouillabilité et la densité de la matière constituent également des facteurs permettant d'optimiser le choix de la technique. Il convient également de prendre en compte la concentration de poussières et sa variabilité pour une conception fiable et robuste. Ces questions sont traitées avec d'autres dans les sections relatives aux techniques à prendre en compte pour les 10 groupes de métaux si les changements des caractéristiques des poussières sont pertinents.

De nombreux opérateurs ont identifié que la performance peut baisser avec le temps car l'équipement s'use et il est nécessaire d'effectuer de la maintenance. Il est recommandé d'utiliser des systèmes modernes pour surveiller en continu la performance par une mesure directe des gaz émis (par exemple poussières, CO, SO₂). D'autres paramètres de contrôle critiques peuvent être surveillés. Il faut intégrer des alarmes dans ces systèmes.

2.8.3.2 Elimination des particules

2.8.3.2.1 Electrofiltres

Les électrofiltres (EP) qui sont correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application constituent des techniques à prendre en compte [tm 75, Theodore 1994; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995; tm 222, VDI 3678 1998]. Les électrofiltres haute température seront utilisés comme étape de pré-traitement avant l'élimination du dioxyde de soufre. Les électrofiltres s'appliquent particulièrement aux gaz humides tels que ceux des systèmes de granulation ou en tant que dépollution finale. Une performance différente est par conséquent requise pour ces applications ce qui affecte les paramètres de conception tels que la taille et le nombre des champs ainsi que la méthode de décolmatage.

Les points suivants sont considérés comme importants :

- Utilisation d'un nombre adéquat de champs, le nombre dépend de la teneur en poussières résiduelle, de la résistivité des poussières et des critères de conception tels que la vitesse et la distribution du gaz et la conception des électrodes. L'utilisation de quatre champs ou plus est généralement à prendre en compte pour une phase de dépollution finale.
- L'emploi de matériaux de construction appropriés pour la matière traitée.
- Il convient de tenir compte des alimentations pour le pré-chargement, l'énergisation par impulsions et la polarité alternative.
- Des électrofiltres humides ou des électrofiltres à électrode mobile peuvent être employés pour les poussières difficiles ou les gaz humides.

Les caractéristiques ci-dessus s'appliquent aux nouveaux électrofiltres seulement.

- Le conditionnement du gaz, l'utilisation d'une bonne distribution du débit gazeux et des poussières, l'emploi de frappe hors tension, le contrôle automatique (par microprocesseur) du système électrique pour chaque champ constituent également des caractéristiques pouvant être intégrées.

Cette caractéristique peut être appliquée à la plupart des installations existantes.

2.8.3.2.2 Filtres à manches

Des filtres correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte [tm 75, Theodore 1994 ; tm 79, Soud 1995 ; tm221, VDI 3677 1997]. Ils comprennent les caractéristiques suivantes : -

- Attention particulière quant au choix du média filtrant et à la fiabilité du système de montage et d'étanchéité. Il convient de pratiquer une maintenance correcte. Les média filtrants modernes sont généralement plus robustes et ont une durée de vie plus longue. Le coût supplémentaire de ces matériaux modernes est plus que compensé par la durée de vie allongée dans bien des cas.
- Ajout de chaux ou d'autres réactifs (par ex. charbon actif) afin de capter les composés gazeux tels que les SO_x ou pour éliminer les dioxines.
- Température de fonctionnement au-dessus du point de rosée du gaz. Des manches et des montages résistants à la température sont employés lorsque les températures de fonctionnement sont supérieures.
- Surveillance en continu des poussières à l'aide d'impacteurs, dispositifs optiques ou triboélectriques pour détecter toute défaillance du filtre à manches. Le dispositif doit interagir si possible avec le système de décolmatage du filtre de façon à ce que les sections individuelles contenant des manches usés ou endommagés puissent être identifiées.
- Le refroidissement du gaz et l'extinction des étincelles si nécessaire, les cyclones sont considérés comme des méthodes appropriées pour l'extinction des étincelles. La plupart des filtres modernes sont montés dans plusieurs compartiments et ceux-ci peuvent être isolés si nécessaire.
- La surveillance de la température et des étincelles permet de détecter les incendies, des systèmes à gaz inerte peuvent être fournis ou des matériaux inertes (par ex. la chaux) peuvent être ajoutés aux effluents gazeux lorsqu'il y a un risque d'inflammation.
- La perte de charge peut être surveillée pour commander le mécanisme de décolmatage.

Toutes ces techniques peuvent s'appliquer aux nouveaux procédés. Elles peuvent également s'appliquer aux filtres à manches existants et être modifiées. Notamment, le système d'étanchéité des manches peut être amélioré pendant les périodes de maintenance annuelle et les manches peuvent être changées pour des tissus plus modernes pendant le calendrier normal de remplacement, ce qui permet de réduire les coûts futurs.

2.8.3.2.3 Filtres céramiques

Des filtres correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte [tm 79, Soud 1995]. Ils peuvent comprendre les caractéristiques suivantes :

- Attention particulière quant au choix et à la fiabilité du logement, du montage et de l'étanchéité.
- Utilisation de logements et de montages résistants à la température.
- Surveillance en continu des poussières à l'aide d'impacteurs, dispositifs optiques ou triboélectriques pour détecter toute défaillance. Le dispositif doit interagir si possible avec le système de décolmatage du filtre de façon à ce que les sections individuelles contenant des éléments usés ou endommagés puissent être identifiées
- Un conditionnement du gaz est prévu si nécessaire.
- L'emploi de la perte de charge pour surveiller et commander le mécanisme de traitement.

Toutes ces techniques peuvent s'appliquer aux nouveaux procédés. Elles peuvent également s'appliquer aux filtres céramiques existants et être modifiées. Notamment, le système d'étanchéité peut souvent être amélioré pendant les périodes de maintenance annuelle

2.8.3.2.4 Laveurs humides

Des laveurs correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte lorsque la nature des poussières ou la température du gaz interdit l'emploi d'autres techniques [tm 79, Soud 1995] ou lorsque les poussières conviennent particulièrement à un traitement dans un laveur. On peut également les utiliser lorsque les gaz doivent être éliminés simultanément avec des poussières ou lorsqu'ils font partie d'une chaîne de techniques de dépollution par exemple dans le dépoussiérage avant une unité de fabrication d'acide sulfurique. Il est recommandé d'employer une énergie suffisante afin de garantir l'humidification et l'interception des particules.

Il convient que les laveurs humides comprennent un système de surveillance de la perte de charge, du débit de la solution et (si des gaz acides sont dépollués) du pH. Les gaz lavés sortant du laveur doivent être dirigés vers un dévésiculeur.

Ces caractéristiques de contrôle du laveur peuvent également s'appliquer à la plupart des installations existantes.

2.8.3.2.5 Chambres de post-combustion et torchères

Des installations qui sont correctement conçues, construites et dimensionnées pour l'application sont des techniques à prendre en compte pour éliminer les COV, les dioxines, les particules organiques ou de carbone ou les gaz combustibles tels que le CO ou l'H₂. La chaleur doit être récupérée lorsque cela est possible. Les principales exigences pour une combustion efficace dans une unité de post-combustion sont les suivantes :

- Le temps de séjour dans la chambre de combustion ou le système de régénération doit être suffisamment long avec suffisamment d'oxygène pour garantir une combustion complète. Une efficacité de destruction de 99% nécessite généralement un temps de séjour de 2 secondes à la température appropriée en fonction de la présence de composés chlorés. Des temps de séjour et des températures inférieurs peuvent tous aussi bien détruire complètement les COV et les dioxines mais il convient de le démontrer à un niveau local dans des conditions d'exploitation réalistes. Il faut que les gaz soient rapidement refroidis dans la fenêtre de température de reformation de dioxines. La turbulence est nécessaire pour fournir une chaleur et un transfert de masse efficaces dans la zone de combustion et pour éviter les « points froids ». Cela est généralement obtenu avec des brûleurs générant une flamme de combustion tourbillonnante et en intégrant des étages dans la chambre de combustion.

- Une température de fonctionnement de 200 °C - 400 °C au-dessus de la température d'auto-allumage de la substance la plus stable, les températures minimales de fonctionnement sont supérieures à 850 °C. Lorsque le gaz contient des substances chlorées, les températures doivent être portées à 1100 °C – 1200 °C, et un refroidissement rapide des gaz émis est nécessaire pour éviter la re-formation de dioxines.
- Les unités de catalyseur fonctionnent à des températures inférieures et les torchères nécessitent de la turbulence, de l'air, et une source d'inflammation. Si nécessaire, du combustible supplémentaire peut être ajouté.
- Il est recommandé que les brûleurs aient un contrôle du rapport air/combustible par microprocesseur afin d'optimiser la combustion.
- Il faut démontrer la performance de la combinaison équipement, température de fonctionnement et temps de séjour afin de prouver la destruction réelle des matières présentes dans le gaz en entrée.

Ces caractéristiques peuvent également s'appliquer à la plupart des chambres de post-combustion existantes. Les températures de fonctionnement peuvent être optimisées et il est possible que l'enrichissement à l'oxygène plutôt que à l'air augmentera le temps de séjour du gaz (volume de gaz plus petit) tout en augmentant la température de fonctionnement [tm 217, VDI 2442 1987; tm 218, VDI 2443 1995; tm 220, VDI 3476 1990].

Méthode de dépollution	Utilisations potentielles	Problèmes potentiels	Émission associée en mg/Nm ³	Motif du choix
Filtres à manches	Presque toutes avec des tissus bien étanches et modernes	Obstruction, incendie, étanchéité	1 - 5	Performance pour les poussières appropriées si bien surveillé. Possibilité de recyclage des poussières vers procédé
Electrofiltre humide	Performance améliorée pour les gaz humides	Rupture et réduction des câbles	< 5 Optiquement clair	Performance pour les poussières appropriées, faible perte de charge mais production d'effluents
Electrofiltre	Presque toutes avec de bons systèmes de contrôle et distribution de gaz	Variation des particules, rupture et réduction des câbles	5 – 10 (< 50 comme pré-traitement)	Faible perte de charge, fiable, faible maintenance
Laveurs humides	Seules quelques poussières sont appropriées. Traitement des gaz combustibles ou des gaz pour l'unité de fabrication d'acide	Faible performance et colmatages	< 20	Pré-traitement des gaz, avant d'autres méthodes. Elimination des gaz acides et des brouillards
Filtres céramiques	Fonctionnement haute température	Fragilité, colmatage et étanchéité	< 1	Les poussières doivent être appropriées. Limites du matériau du logement à température élevée
Cyclones	Pré-traitement	Faible performance. Efficacité limitée pour les particules fines.	< 50	Pré-traitement des gaz avant d'autres méthodes
Les émissions sont fournies en moyennes journalières sur la base d'une surveillance continue en période de fonctionnement				

Tableau 2.13 : Vue d'ensemble des techniques de dépoussiérage

Méthode de dépoussiérage	Application	Émission de poussières mesurée en mg/Nm ³	Commentaires
Filtre à manches (180 000 – 250 000 Nm ³ /h)	Plomb secondaire – batteries – élimination de PE	0,7 à 3,4 (moyenne mensuelle)	Four rotatif court, France
Filtre à manches (260 000 Nm ³ /h)	Cadmium – recyclage de batteries.	< 1 (moyenne mensuelle)	
Laveur à cascade	Installation de frittage du ferrochrome.	< 4	Poussière très abrasive – défaillance du filtre à manches par le passé
Filtre à manches	Distillation du zinc New Jersey	3 – 10	
Cyclone + EP + EP humide	Batteries au plomb dans installation Ausmelt	1 - 2	
Filtre à manches	Production de ferroalliage	1 - 5	
Post-combustion, système de refroidissement et filtre à manches	Secteur du cuivre (secondaire)	1 - 5	

Tableau 2.14 : Performance mesurée des systèmes de dépoussiérage avec utilisation de différentes techniques de traitement avec des poussières appropriées.

Les niveaux mesurés sont indiqués sous forme de fourchettes. Ils varient avec le temps en fonction de l'état de l'équipement, de sa maintenance et de la régulation du procédé de l'installation de dépollution. Le fonctionnement du procédé source va également influencer la performance d'élimination des poussières car il est fort probable que des variations de température, de volume du gaz et même des caractéristiques des poussières se produisent pendant un procédé ou un lot. Les émissions que l'on peut obtenir ne constituent donc qu'une base permettant d'évaluer la performance réelle de l'installation, et les émissions atteignables et associées dont il est question dans les chapitres relatifs aux métaux tiennent compte de l'applicabilité des poussières rencontrées et des coûts/avantages d'une application spécifique de la technique. Les dynamiques d'un procédé et d'autres questions spécifiques à un site donné nécessitent d'être prises en compte au niveau local.

2.8.3.3 Systèmes de lavage des gaz

Le recours aux techniques de prévention et de réduction des émissions doit être considéré en premier. La dépollution de ces gaz est souvent possible avec une bonne régulation de procédé, une sélection appropriée des matières premières (par ex. pour exclure la contamination organique), l'utilisation de boucles de récupération ou la fixation de la matière dans un laitier ou une matte. L'utilisation de brûleurs bas-NO_x et d'air de combustion étagée pour les fours et d'autres unités de combustion peut éviter la formation de ces gaz. Des valeurs inférieures à 100 mg/ Nm³ de NO_x ont été reportées [tm 160, Winter Cu 1999].

2.8.3.3.1 Laveurs humides

Des laveurs correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte pour éliminer les faibles concentrations de dioxyde de soufre (inf. à 2%) et d'autres gaz acides tels que l'HF et l'HCl pouvant être produits [tm 79, Soud 1995].

- Il convient que les laveurs humides incluent si possible un système de surveillance de la perte de charge, du débit de la solution et du pH.
- Il est recommandé que les gaz lavés sortent du laveur en étant dirigés vers un dévésiculeur.
- Les solutions d'acides faibles produites par les laveurs doivent être réutilisées si possible.

Ces caractéristiques peuvent également s'appliquer à la plupart des installations de laveur existantes.

2.8.3.3.2 Laveurs secs ou semi-secs

Des laveurs utilisant le réactif correct, qui sont correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte pour éliminer les faibles concentrations de dioxyde de soufre (inf. à 2%) et d'autres gaz acides tels que l'HF et l'HCl pouvant être produits [tm 79, Soud 1995; tm 224, VDI 3927 1998]. Des laveurs secs utilisant du charbon actif sont des techniques à prendre en compte pour éliminer les matières organiques telles que les dioxines ou pour enlever le mercure.

- Les laveurs secs et semi-secs doivent comprendre des chambres de mélange et de réaction appropriées.
- Les particules générées dans la chambre de réaction peuvent être éliminées dans un filtre à manches ou un électrofiltre.
- L'agent de lavage qui a partiellement réagi peut être recyclé dans le réacteur.
- L'agent de lavage utilisé doit être utilisé dans le procédé principal si possible. Par exemple l'alumine et l'oxyde de zinc peuvent être employés dans leurs procédés respectifs.
- Les laveurs semi-secs doivent comprendre un dévésiculeur si des brouillards sont produits.

Ces caractéristiques peuvent également s'appliquer à la plupart des installations existantes.

2.8.3.4 Systèmes de récupération des gaz

Des systèmes correctement conçus, construits et dimensionnés pour l'application sont des techniques à prendre en compte pour éliminer les différentes concentrations de composés gazeux.

2.8.3.5 Captage du soufre

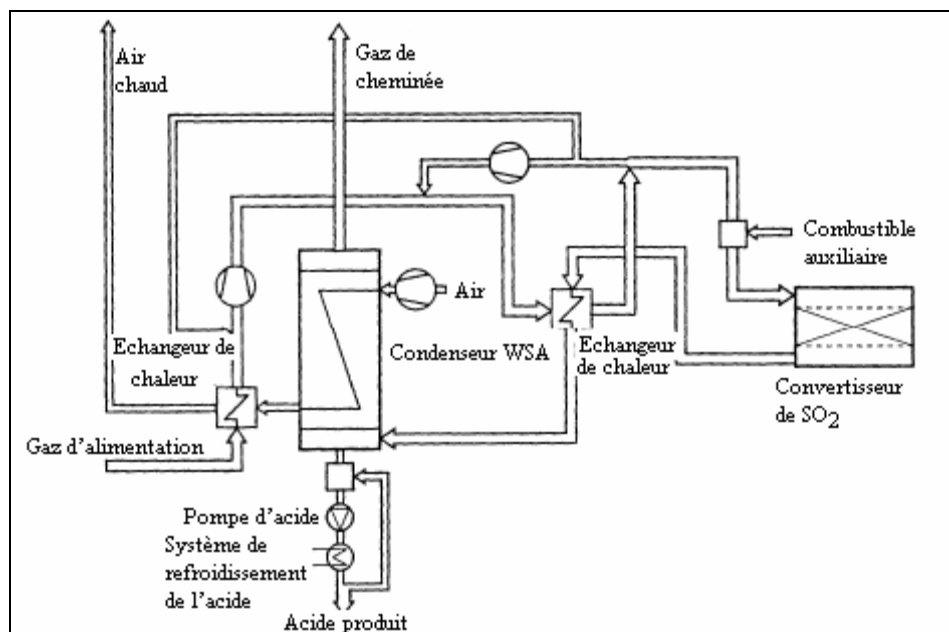
Les techniques actuellement éprouvées sont la production d'acide sulfurique et l'absorption du dioxyde de soufre dans de l'eau ou de l'eau de mer froide suivies d'un lavage par tirage sous vide et d'une récupération comme dioxyde de soufre liquide. La récupération sous forme de dioxyde de soufre est fonction du marché local pour ce matériau.

Les unités d'acide sulfurique de contact à double absorption ont une efficacité de conversion supérieure aux unités de contact à simple absorption. Leur conversion en unité par contact à double absorption est complexe et onéreuse mais l'utilisation d'une unité de contact à simple absorption avec la désulfurisation des gaz de queue pour produire du gypse destiné à la vente permet d'économiser de l'énergie et de générer moins de déchets.

Les installations suivantes sont des exemples de bonne pratique actuelle :

EXEMPLE 2.01 PROCÉDÉ D'ACIDE SULFURIQUE DE GAZ HUMIDE (WSA) POUR LA PRODUCTION D'ACIDE SULFURIQUE ISSU DES ÉMISSIONS AVEC UNE TENUEUR FAIBLE EN SO₂

Description : Ce procédé est particulièrement approprié pour la production d'acide sulfurique provenant des effluents gazeux lorsque la teneur en SO₂ est faible. Dans ce procédé, jusqu'à 99,3% du SO₂ est converti par un catalyseur en SO₃ qui réagit avec l'eau dans le gaz, formant ainsi de l'acide sulfurique gazeux. Cet acide est condensé dans un condenseur WSA. Grâce à l'économie d'énergie et au peu de sensibilité à l'équilibre de l'eau, aucun brûlage supplémentaire du soufre n'est requis quelle que soit la concentration de SO₂. La figure ci-dessous montre un schéma de principe type d'une installation WSA pour le grillage de la molybdénite.



Le catalyseur employé dans la technologie WSA est un catalyseur au vanadium enrichi en potassium et en sodium dans des anneaux extrudés de 10 et 20 mm.

Principaux avantages environnementaux : La conversion du SO_2 en acide sulfurique réduit les émissions de SO_2 et par conséquent l'effet des pluies acides.

Données opérationnelles : Les données type relatives à la performance d'une installation WSA sont présentées dans le tableau suivant.

	Frittage du plomb
Débit en Nm^3/h	100 000
T entrée $^{\circ}\text{C}$	30 – 35
T sortie $^{\circ}\text{C}$	105
Entrée H_2O , vol. en %	5,5
Entrée O_2 , vol. en %	14,2
Teneur en SO_2 , vol. en %	2 – 3,5
conversion en %	> 99
SO_3 dans gaz propre mg/Nm^3	< 28
Produit de H_2SO_4 , poids en %	> 97,5
Temp. du produit $^{\circ}\text{C}$	21
Production d'acide (t/j)	~ 290
Consommation d'énergie (électricité et combustible) en kW	850 (à 2,7% de SO_2)
Consommation d'eau de refroidissement Gcal/h/tonne d'acide	0,25 ($\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$)

Effets croisés: Le procédé WSA en lui-même ne génère aucun déchet (sauf le catalyseur usé) ni d'eaux usées et n'utilise aucun absorbant ni tout autre produit chimique. Dans le cas où l'installation WSA serait utilisée pour convertir le SO_2 provenant d'un four de grillage de molybdénite en acide sulfurique, les effluents gazeux doivent d'abord être traités. Le traitement peut être effectué à l'aide d'un électrofiltre humide ou d'un laveur humide lorsque les poussières respectivement la boue sont générées comme résidu de procédé.

Aspects économiques : Non disponible

Applicabilité : Le procédé WSA peut s'appliquer à toutes les installations nouvelles ou existantes notamment pour les fours de grillage de molybdénite et de plomb où la teneur en SO₂ est inférieure à 5 - 6%.

Documents de référence : [tm 165, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm 166, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm 167, Bendixen, Haldor Topsøe, 1997], [tm 205, SADACI 1999]

EXEMPLE 2.02 UNITE D'ACIDE SULFURIQUE FONCTIONNANT DANS DES CONDITIONS DE GAZ VARIABLES

Description : Section de traitement et de lavage du gaz. Unité d'acide sulfurique de contact à double absorption, 4 – 5 étages, catalyseur moderne. Acide faible à neutralisation ~ 12 – 15 m³/h avec 5% d'H₂SO₄ et décomposition thermique de la purge d'acide avec concentration d'acide supérieure (~50%)

Principaux avantages environnementaux : Taux élevé de conversion pour le dioxyde de soufre. Plus de 99,6% obtenu avec une installation récente.

Données opérationnelles :

Composé	Valeurs mesurées	
Volume de l'effluent gazeux	320 000	Nm ³ /h
SO _x	100 - 1100	mg/Nm ³
SO ₃	20 - 40	mg/Nm ³
NO _x (NO ₂)	20 - 45	mg/Nm ³
Cl ⁻ (HCl)	2 - 7	mg/Nm ³
F ⁻ (HF)	1 - 4	mg/Nm ³
Moyenne – poussières résiduelles :	< 2	
Plage - poussières résiduelles :	1 - 7	
Plage – composés :		
Cd	< 0,01 – 0,02	mg/Nm ³
Hg	< 0,01 – 0,07	mg/Nm ³
Tl	< 0,01 – 0,02	mg/Nm ³
As	< 0,01 – 0,1	mg/Nm ³
Se	< 0,01 – 0,02	mg/Nm ³
Sb	< 0,01 – 0,03	mg/Nm ³
Pb	< 0,01 – 0,15	mg/Nm ³
Cu	< 0,01 – 0,09	mg/Nm ³
PCDD/PCDF	0,001 – 0,01	ng ITE/m ³

Effets croisés : Effet positif – réduction des émissions principales de dioxyde de soufre par conversion en acide sulfurique, récupération de la chaleur des gaz et développée durant la conversion.

Aspects économiques : Voir annexe sur les coûts

Applicabilité : Effluents gazeux du four de fusion primaire (concentration de SO_x > 6% ; combinaison possible avec les effluents gazeux du four de fusion secondaire). Ces caractéristiques peuvent également s'appliquer à la plupart des installations existantes.

Exemple d'usine : Allemagne

Documents de référence : [tm 124, DFIU Cu 1999]

EXEMPLE 2.03 UNITÉ D'ACIDE SULFURIQUE MODERNE FONCTIONNANT DANS DES CONDITIONS IDEALES

Description : Unité d'acide sulfurique de contact à double absorption, 4 étages avec absorption intermédiaire après le 3ème étage, catalyseur moderne conçu par Monsanto, système de récupération de la chaleur (vapeur) après le 1ère étage traitant les effluents gazeux d'un four de fusion flash Outokumpu et d'un four de conversion instantanée avec 30 - 40% de SO₂.

Principaux avantages environnementaux : Conversion maximale du dioxyde de soufre.

Données opérationnelles : Dilution à 14% de SO₂ à l'entrée de la tour de séchage, débit moyen annuel de 171 300 Nm³/h. Conversion jusqu'à 99,9% obtenue avec une installation récente. ~ 150mg/Nm³ de SO₂ dans le gaz de queue comme moyenne annuelle. L'installation repose sur une alimentation en dioxyde de soufre élevée et constante et emploie un catalyseur dopé en Cs.

Effets croisés : Effet positif - réduction des émissions principales de dioxyde de soufre.

Aspects économiques : Non évaluée.

Applicabilité : Cas spécifique pour des conditions de gaz d'alimentation idéales.

Exemple d'usines : Etats-Unis.

Documents de référence : - [tm 140, Finland Cu 1998]

L'émission de dioxyde de soufre des unités d'acide sulfurique est proportionnelle à la teneur en dioxyde de soufre du gaz en entrée et du taux de conversion. Une conversion à 99,8% d'un gaz en entrée contenant 15% de SO₂ conduit à une émission d'environ 900 mg/ Nm³ de SO₂. Ces procédés emploient par conséquent de grandes cheminées pour aider à la dispersion des gaz, la hauteur de la

cheminée tient également compte des émissions probables durant le démarrage et l'arrêt de l'installation lorsque l'efficacité totale n'est pas encore atteinte. Les facteurs locaux et spécifiques au site font partie de ces réflexions. L'emploi de filtres à bougie avant la cheminée finale est une technique à envisager si un brouillard d'acide est produit.

Il convient d'envisager l'élimination ultérieure du dioxyde de soufre du gaz final en sortie à l'aide d'un laveur humide ou semi-sec si des exigences environnementales spécifiques doivent être respectées.

2.8.3.6 Dioxines

Ce sujet est traité sous l'intitulé correspondant dans la section ci-dessus sur les techniques appliquées. Les techniques exposées dans cette section sont toutes des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD en fonction de la source du matériau et du potentiel de synthèse de novo.

2.8.3.7 Elimination des autres impuretés

Ce sujet est traité sous l'intitulé correspondant dans la section ci-dessus sur les techniques appliquées. Les techniques exposées vont s'appliquer à des domaines spécifiques. Elles sont traitées ultérieurement dans les chapitres relatifs aux métaux.

2.8.3.8 Utilisation de l'oxygène dans les systèmes de combustion

Il s'agit d'une technique à envisager et qui peut s'appliquer à la plupart des procédés de combustion et pyrométallurgiques utilisés [tm 125, ETSU 1994]. L'emploi de l'oxygène peut avoir des avantages à la fois financiers et environnementaux à condition que l'installation puisse utiliser la chaleur supplémentaire libérée. Il se peut que des concentrations d'oxydes d'azote supérieures soient produites avec l'enrichissement à l'oxygène mais la réduction du volume des gaz associée signifie généralement que la masse est réduite. Ceci est traité ultérieurement dans les chapitres relatifs aux métaux.

2.8.3.9 Techniques de régulation des procédés pour l'installation de collecte et de dépollution

Les techniques couvertes sous cet intitulé peuvent être directement appliquées aux procédés existants. Il existe certains cas (par ex. hauts fourneaux) dans lesquels il est nécessaire de développer et d'employer une régulation moderne de procédé. Un travail supplémentaire est nécessaire pour identifier les paramètres et systèmes pertinents pour le contrôle.

2.9 Traitement des effluents et réutilisation de l'eau

2.9.1 Principales sources de génération d'effluents liquides

La présente section offre une vue d'ensemble sur la génération d'effluents liquides dans un procédé courant. Les méthodes pour réduire le volume des eaux usées, la pratique du recyclage de l'eau et le traitement des effluents dans une usine de traitement des eaux usées locale ou centrale sont traités afin de mieux comprendre certains des concepts pouvant être transférés entre les groupes de métaux [tm 28, WRC 1993].

La production de métaux non-ferreux par des méthodes pyrométallurgiques et hydrométallurgiques est liée à la génération de différents effluents liquides. Les sources principales des flux d'effluents les plus importants peuvent être classées comme montré dans le tableau suivant.

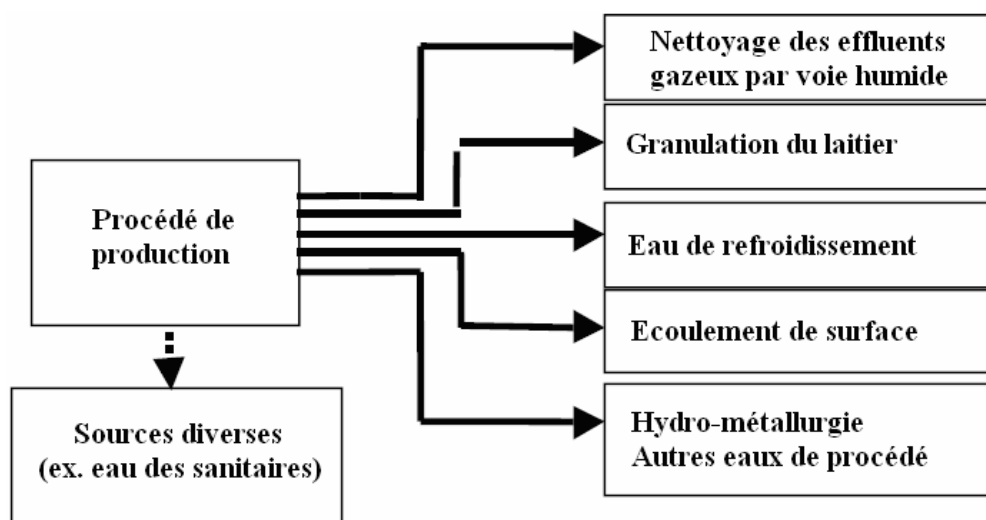


Figure 2.38 : Classement des effluents

Les écoulements d'eaux usées montrés ci-dessus peuvent être contaminés par des composés métalliques issus des procédés de production et peuvent avoir un impact environnemental élevé. Même à de faibles concentrations, certains métaux comme le mercure et le cadmium sont très toxiques. Cela peut être illustré par le fait que le mercure et le cadmium sont en tête de liste des substances dangereuses prioritaires listées par la Conférence de la mer du Nord de 1984 qui exige une réduction des émissions de 50% dans la mer du Nord. L'effet toxique de certains composés métalliques est également dû au fait que dans les conditions chimiques adéquates, les métaux peuvent facilement pénétrer dans les cours d'eau naturels comme espèces solubles et être assimilés rapidement et de manière irréversible dans la chaîne alimentaire [tm 169, J.H. Clark 1995].

La présente section offre d'abord une vue d'ensemble sur les différentes sources d'effluents que l'on peut trouver dans une usine de production de métaux non-ferreux. Dans une seconde partie, la section reflète les techniques normalement utilisées pour traiter les effluents d'eaux usées contaminés.

2.9.1.1 Effluents provenant du traitement des effluents gazeux

Les équipements de traitement de la pollution de l'air par voie humide sont progressivement remplacés par des techniques de traitement par voie sèche. Les techniques de traitement par voie sèche comme les filtres à manches offrent l'avantage qu'aucune boue ni eau usée ne doivent être traitées et que les

poussières captées peuvent souvent être recyclées directement dans le procédé principal ; les effets croisés sont par conséquent réduits en comparaison aux systèmes par voie humide.

Il existe certains cas où des techniques de traitement de l'air par voie humide par ex. laveurs humides ou électrofiltres humides, doivent être appliquées. Elles sont notamment employées lorsque d'autres systèmes de dépollution ne sont pas appropriés, qu'il y a un risque d'explosion ou de combustion de particules inflammables et si des substances gazeuses (par exemple du dioxyde ou du trioxyde de soufre) ainsi que des particules doivent être éliminées des effluents gazeux. Les électrofiltres humides sont nécessaires lorsque des gaz humides et saturés avec une teneur élevée en particules doivent être traités. Par exemple, pendant la production de zinc et de cuivre primaires, les effluents gazeux du procédé, qui contiennent des poussières et du dioxyde de soufre, sont traités à l'aide d'un laveur et d'un électrofiltre humide. Les électrofiltres humides sont également employés pour capter le brouillard de goudron dans les gaz émis par un four de cuisson d'électrodes. Dans les laveurs humides, l'accélération et la décélération du flux gazeux et du liquide de lavage atomisé produit de fortes turbulences entre les gaz, les poussières et les gouttelettes de liquide. Les particules de poussière s'humidifient très rapidement et les réactions chimiques sont accélérées. Un collecteur ultérieur extrait les gouttelettes de liquide et les poussières humides du flux gazeux. Les effluents contaminés peuvent alors être retirés pour un traitement ultérieur. S'il n'y a pas d'enrichissement des composés solides dans la solution de lavage, l'élimination des solides en suspension par un épaississant permet de réutiliser l'eau de lavage. Toutefois, dans certains cas, il faut précipiter les composés solubles pour réutiliser l'eau de lavage.

L'effluent liquide nécessite généralement un traitement ultérieur par exemple par neutralisation et/ou sédimentation pour la séparation solide-liquide. Des mesures de traitement spécifique sont parfois employées comme l'échange d'ions pour retirer tout composé métallique de valeur ou très nocif. Par exemple, l'échange d'ions permet de récupérer le rhénium de l'effluent du laveur qui est généré par le lavage des effluents gazeux provenant d'un four de grillage de molybdénite. Ce procédé est employé à la fois pour retirer un composé métallique des eaux usées et est utilisé comme la source la plus importante pour la production du rhénium métal.

Le liquide traité peut normalement être renvoyé au système de traitement par voie humide mais une purge est nécessaire pour contrôler la composition de la solution. L'acide faible provenant de ces procédés peut également être réemployé dans d'autres procédés s'ils sont disponibles.

Il a été reporté que dans certains cas, l'eau de procédé issue du système de lavage humide d'un four de fusion contient des cyanures formés par la réaction du carbone avec l'azote atmosphérique. Le niveau de cyanures peut être réduit à l'aide de l'eau de lavage pour la granulation du laitier ce qui conduit à l'évaporation et à l'oxydation de la plupart des cyanures.

Un autre type d'effluent principal se produit avec l'élimination du mercure de certains effluents gazeux de fours de grillage. L'élimination du mercure nécessite une cuve à contact gaz-liquide avec une solution de chlorure de mercure (HgCl_2). Ce chlorure de mercure réagit avec le mercure métallique du gaz pour former un précipité solide d' Hg_2Cl_2 (« calomel »). La boue précipitée est retirée et oxydée avec du Cl_2 pour former la solution de lavage HgCl_2 . Une partie de la boue est déshydratée par un filtre-pressé et vendue sous forme d' Hg_2Cl_2 pour la récupération du mercure ou mise en décharge comme déchet spécial.

Les effluents issus du procédé sont prétraités localement pour retirer le mercure par réaction avec de la poussière de zinc ou par précipitation sous forme d' HgS avant traitement dans une usine finale de traitement des effluents.

2.9.1.2 Effluent issu de la granulation du laitier, production de grenailles et séparation par densité

Pendant la production des métaux non-ferreux, le laitier et le métal produits vont être coulés depuis les fours. Le métal fondu et le laitier peuvent être granulés séparément en les versant dans de l'eau, en utilisant un jet d'eau haute pression ou dans d'autres systèmes de trempe pour former des particules de même taille. Le métal granulé peut ensuite être vendu comme grenaille. Le laitier granulé peut être employé à d'autres fins. La figure suivante montre une étape de granulation type.

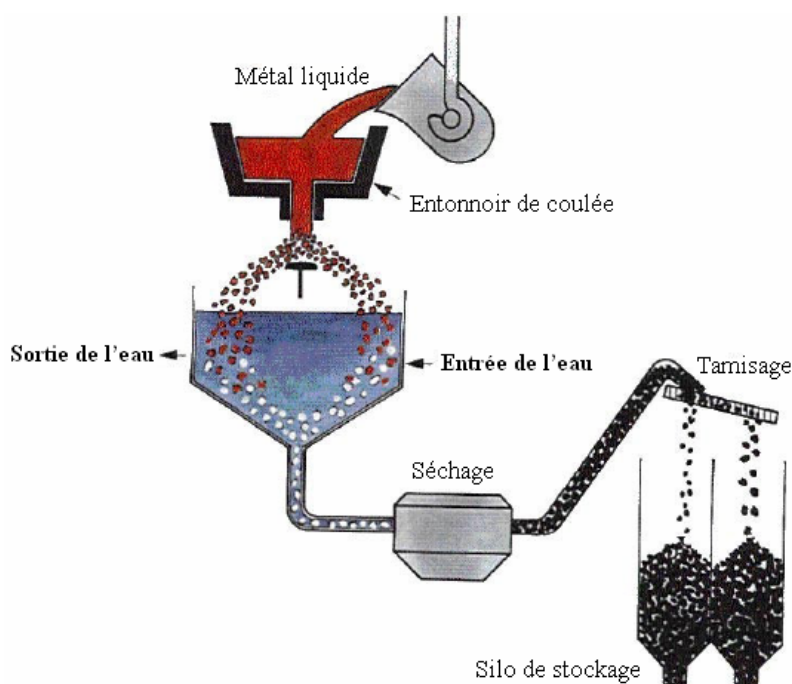


Figure 2.39 : Granulation du métal fondu

[tm 152, Schei, Tuset, Tveit, 1998]

L'effluent liquide qui est produit par la phase de granulation est généralement recyclé en circuit fermé. Pour éviter que les solides en suspension et les composés métalliques ne s'accumulent, une quantité doit être retirée en continu du circuit de circulation d'eau. L'effluent extrait peut être envoyé vers une usine de traitement des eaux usées centrale ou être traité séparément.

La séparation par densité (matériaux flottants et matériaux immergés) est également employée pour séparer les métaux et les composés des contaminants légers, par exemple l'élimination des composants plastiques après broyage. L'effluent liquide produit est généralement recyclé et le matériau flottant est retiré. Pour éviter que les solides en suspension et les métaux ne s'accumulent, une quantité doit être retirée en continu du circuit de circulation de l'eau. L'effluent sous pression est généralement envoyé vers une usine de traitement des eaux usées centrale.

2.9.1.3 Eau de refroidissement

L'eau de refroidissement est employée à grande échelle pour les différents besoins de refroidissement dans la production des métaux. Elle peut être divisée en eau de refroidissement sans contact et en eau de refroidissement par contact.

- L'eau de refroidissement sans contact est employée pour refroidir les fours, les hottes de four, les machines de coulée etc. En fonction de l'emplacement de l'installation, le refroidissement peut être réalisé par un système de refroidissement à passage unique ou un système de re-circulation avec des tours de refroidissement à évaporation. L'eau d'un système de refroidissement à passage unique est normalement rejetée ensuite vers le milieu naturel, par exemple une rivière ou un étang de refroidissement. Dans ce cas, il convient de tenir compte de l'augmentation de température avant que l'eau ne soit rejetée dans le milieu d'eau naturelle. L'eau de refroidissement sans contact peut également être recyclée via des tours de refroidissement.
- Le refroidissement par contact direct est employé pendant certaines opérations de coulée. Cette eau de refroidissement est normalement contaminée avec des métaux et des solides en suspension et est produite souvent en grandes quantités. En raison de la matrice spécifique et pour éviter les

effets de dilution, il faut que l'eau de refroidissement par contact direct soit principalement traitée séparément des autres eaux usées.

Afin de réduire au minimum l'impact du refroidissement sur l'environnement dans l'ensemble, il est recommandé d'utiliser le document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les systèmes de refroidissement.

2.9.1.4 Écoulements d'eau en surface

Les écoulements d'eaux en surface sont dus à la contamination de l'eau de pluie captée depuis les toits des bâtiments et zones goudronnées sur le site de production. La contamination de l'eau de pluie se produit lorsque des matières comme des métaux contenant des poussières provenant du stockage, des dépôts de surface etc. ou des huiles sont lavés dans le système de drainage. La contamination de l'eau de surface peut être évitée ou minimisée en utilisant des bonnes pratiques pour le stockage des matières premières et par une maintenance et un nettoyage appropriés de toute l'usine de production.

Les écoulements en surface peuvent être captés séparément. Après une phase de sédimentation ou un traitement chimique, elles peuvent être réutilisées à d'autres fins dans le procédé de production, par exemple comme eau de refroidissement ou pour la pulvérisation d'eau pour éviter la formation de poussières.

2.9.1.5 Effluents issus du procédé hydrométallurgique

Les sources principales d'effluents liquides générés par la production hydrométallurgique des métaux non-ferreux sont listées dans le tableau ci-dessous.

Unité de procédé	Opération/source	Options d'utilisation
traitement des gaz de grillage	Traitement par voie humide des gaz grillés	Installation de traitement des eaux usées constituée de phases de précipitation parfois d'une élimination des métaux lourds à l'aide d'échangeurs d'ions
Lixiviation	Opérations générales dont le traitement par voie humide des gaz	Retour vers la lixiviation
Purification	Opérations générales	Retour vers la lixiviation ou phase suivante de procédé
Électrolyse	Nettoyage des cellules, anodes et cathodes. Electrolyte utilisé. Purge d'électrolyte	Retour vers la lixiviation. Retour vers l'électrolyse après traitement.

Tableau 2.15 : Sources potentielles d'effluents liquides provenant de la production électrolytique des métaux non-ferreux

Le procédé de production hydrométallurgique commence généralement par une lixiviation. Pendant la lixiviation, le métal souhaité et d'autres éléments vont être libérés du minéral et partent en solution.

Les réactifs et réactions de lixiviation types sont listés ci-dessous [tm 107, Ullmans 1996].

- eau pour composés hydrosolubles (sulfate de cuivre) ;
- acides sulfurique, chlorhydrique et nitrique ou hydroxyde de sodium pour les oxydes métalliques ;
- agents complexants par ex. cyanure (or, argent) ou ammoniac (minéraux de cuivre et de nickel) ;
- réduction d'un minerai par un gaz approprié ou oxydation, par exemple le dioxyde de manganèse par du dioxyde de soufre, et la matte de nickel par du chlore ;

- réactions acido-basiques, par ex. récupération du complexe de tungstène à partir du tungstène à pH élevé.

Pour augmenter la quantité de métal désiré dans la solution de lixiviation, plusieurs techniques de purification et d'enrichissement hydrométallurgiques peuvent être employées. Le métal ciblé peut être récupéré de la solution purifiée à l'aide de différentes techniques comme la cémentation, les réactions gazeuses, la précipitation sélective, l'échange d'ions, l'extraction par solvants, la cristallisation, la concentration par évaporation ou l'électrolyse. Pour garantir un équilibre correct dans certains de ces procédés, il est normalement nécessaire de retirer constamment une partie de la solution.

Pendant la production de zinc par exemple, l'électrolyte peut être purgé pour contrôler l'accumulation de magnésium qui peut avoir un impact négatif sur le fonctionnement des cellules électrolytiques. Les écoulements dans les cellules électrolytiques appartiennent au même circuit d'eau (fermé) comme phases de lixiviation et de purification : l'acide sulfurique formé durant l'électrolyse alimente le procédé de lixiviation et le liquide restant est purifié et est dirigé vers l'électrolyse.

La purge d'effluent du circuit électrolytique-lixiviation-purification est fortement acide et contient des concentrations élevées de zinc et de solides en suspension. Le volume de la purge dépend fortement de la composition des concentrés de zinc employés dans le grillage. Les composés qui ont tendance à s'accumuler (c'est-à-dire qui ne sont pas suffisamment retirés de la solution) dans le circuit, notamment le magnésium, vont déterminer le débit de purge.

De nombreuses usines ont déjà démontré que les effluents générés comme purge d'électrolyte peuvent être recyclés vers l'opération de lixiviation en fonction des contaminants présents. La purge d'électrolyte peut également être recyclée en électrolyse après l'élimination des contaminants ou des éléments de moindre valeur.

2.9.1.6 Autres eaux de procédé

Il existe peu d'effluents directs de procédé rencontrés pendant la production des métaux non-ferreux qui ne soient pas couverts par les intitulés ci-dessus. Les plus importants sont les solutions produites pendant le procédé Bayer pour produire l'alumine et les eaux usées acides produites durant le traitement des batteries acides au plomb ou le traitement des métaux précieux, l'acide sulfurique faible des unités de fabrication d'acide sulfurique et les eaux usées provenant de l'affinage du germanium, du gallium etc. Ces eaux usées sont couvertes plus en détails dans les chapitres spécifiques aux métaux mais les procédés employés sont parfois en mesure de recycler des solutions en les renvoyant dans le procédé ou d'utiliser la valeur acide dans les autres procédés.

Les opérations de stripping sont également des sources d'eaux de procédé et les exemples suivants montrent comment le stripping non acide peut être employé et comment l'impact du stripping à l'acide peut être minimisé.

a) Stripping non acide

Ce procédé fonctionne en circuit étanche. Un fil peut être décapé dans un système en ligne composé d'une conduite d'acier horizontale compartimentée. Une solution d'eau et d'alcool isopropylique (IPA) à 2,5% à 3,5% est employée. Dans le cuivre, le procédé de conversion de la couche d'oxyde cuivreux en phase vapeur pour former du cuivre (resté sur le fil), est connu sous le nom de procédé Burns [tm 92, Copper Expert Group 1998]. L'IPA est récupéré des solutions usées pour réutilisation et les boues contenant des métaux sont récupérées. L'eau provenant de la récupération de l'IPA est généralement envoyée vers l'installation de traitement des eaux usées.

b) Stripping à l'acide

Le stripping à l'acide emploie un système horizontal compartimenté [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Dans une première phase, le matériau est décapé avec de l'acide sulfurique dilué ; puis l'acide résiduel est lavé en différentes étapes de la surface du métal par des pulvérisations d'eau suivies d'un séchage à l'air comprimé. Le stripping de la surface est généralement réalisé avec de l'acide sulfurique mais pour certains alliages et pour des métaux comme le titane, on emploie de l'acide nitrique, parfois

mélange à de l'acide sulfurique, dans des lignes continues ou des systèmes automatiques. Le traitement du gaz permet de récupérer ou d'éliminer les fumées d'acide nitrique, l'acide est changé régulièrement. L'acide utilisé est retraité pour récupérer le métal. Les systèmes de stripping sont ventilés pour protéger les opérateurs

Les produits sont rincés et l'eau de rinçage est traitée, les boues sont recyclées si possible. Pour le dégraissage de surface des produits laminés, on utilise des détergents à l'eau. L'eau utilisée est traitée par une ultra filtration. Si des solvants organiques sont employés pour le dégraissage de surface, on utilise un système de dégraissage à vapeur. Dans ce cas, des hydrocarbures chlorés peuvent être présents dans toute boue de traitement des eaux usées produite.

Une alternative est employée pour certaines productions de fils de cuivre. Après un refroidissement partiel dans un long tube rempli d'eau, le fil est formé en spirales correspondant au diamètre de la bobine. Ces spirales sont étendues sur une table de laminage où la température est abaissée à 20 °C par des pulvérisateurs d'eau. Un convoyeur en alliage résistant aux acides transporte ces spirales dans les réservoirs de stripping où le fil est décapé avec une solution à 20% d'acide sulfurique. Ce système de stripping par acide déposé garantit une élimination parfaite de tous les oxydes de la surface du fil. Les boucles sont ensuite lavées avec de l'eau de rinçage et enfin protégées par une solution de cire.

L'extraction électrolytique peut être utilisée pour récupérer le métal dissous par l'acide de stripping. La solution de lavage peut être traitée par échange d'ions.

2.9.1.7 Sources diverses

De nombreuses autres sources sont intégrées dans une installation industrielle de production de métaux non-ferreux. Les exemples sont les effluents liquides provenant des stations de nettoyage des camions fournissant les matières premières ; l'eau de scellement des pompes ; le fonctionnement général dont le nettoyage des équipements, des sols, etc. Ces effluents liquides sont normalement captés et traités. L'eau des sanitaires est normalement évacuée dans le réseau public d'eaux usées.

2.9.2 Techniques de traitement appliquées

Les méthodes de traitement appliquées qui vont être traitées dans cette partie constituent également des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Pour les mesures relatives au traitement et aux usines de traitement des eaux usées, il est très difficile dans cette partie du document de définir un niveau de MTD. Les méthodes de traitement et par conséquent les niveaux d'émission que l'on peut atteindre dépendent fortement du procédé spécifique et des métaux concernés [tm 211, Noyes 1993]. En raison de ce problème, les techniques de cette partie ne seront décrites que d'une manière générale en soulignant leurs avantages et inconvénients. Pour des informations plus détaillées, notamment sur les niveaux d'émissions que l'on peut atteindre, il faut se référer aux chapitres spécifiques pour les différents métaux non-ferreux.

2.9.2.1 Mesures intégrées dans les procédés

Les techniques et méthodes pour réutiliser l'eau sont déjà employées avec succès dans le secteur des métaux non-ferreux pour minimiser la quantité d'effluents liquides qui doivent être rejetés comme eaux usées. La réduction des eaux usées est parfois également économiquement viable car étant donné que la quantité d'eaux usées rejetée est réduite, la quantité d'eau fraîche qui doit être prélevée dans le milieu aquatique est elle aussi réduite. Cela représente également un avantage pour les effets croisés.

Le tableau suivant montre à titre d'exemple pour quelques métaux non-ferreux, les phases de procédés desquelles les effluents liquides sont déjà largement recyclés et réutilisés.

Recyclage et/ou réutilisation des effluents dans le secteur des métaux non-ferreux						
Source	Procédé de production					
	Cuivre primaire	Cuivre secondaire	Plomb primaire	Plomb secondaire	Zinc primaire	Zinc secondaire
Granulation du laitier	■	■	■		■	■
Traitement de la pollution de l'air par voie humide	■	■	■	■	■	■
Effluent de lavage de gaz de grillage			■		•	
Eau de refroidissement	■	■	■	■	■	■
Eau de rinçage d'anode et de cathode	■	■			■	Non réf.
Électrolyte utilisé	■	■			■	Non réf.
Cassage de batterie				■		
Classification de batteries				■		
Désulfurisation de pâte de plomb				■		

Tableau 2.16 : Vue d'ensemble du recyclage et de la réutilisation

Les techniques de recyclage et de réutilisation sont des mesures intégrées aux procédés. Le recyclage implique la recirculation du liquide vers le procédé où il a été généré. La réutilisation d'un effluent signifie la re-circulation d'une source d'eau pour un autre objectif par ex. les écoulements de surface peuvent être réemployés comme eau de refroidissement.

Normalement, un système de recyclage nécessite une technique de traitement basique ou une extraction d'environ 10% du liquide en circulation pour éviter une accumulation des solides en suspension, des métaux et des sels dans le système de recirculation. Par exemple, l'eau de refroidissement est normalement recyclée et dirigée dans un système de recirculation comme montré ci-dessous. Les biocides doivent être prélevés.

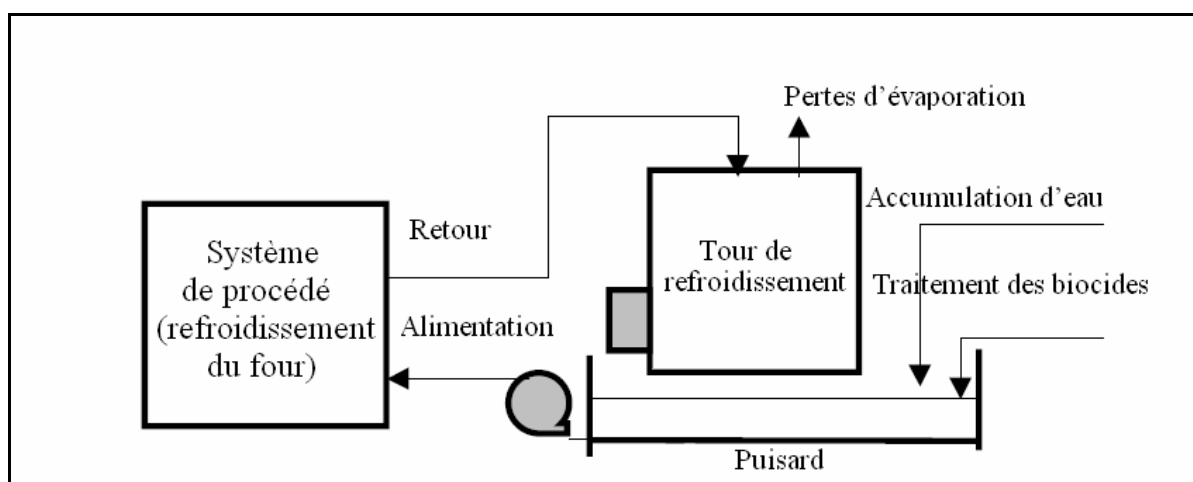


Figure 2.40 : Exemple d'un système de recirculation d'eau de refroidissement

Si de grandes quantités d'eau sont disponibles par exemple sur un site côtier, un système d'eau de refroidissement en écoulement peut être employé à condition que l'impact environnemental soit négligeable. Néanmoins, les effets sur le milieu marin dans la zone d'aspiration de ce système doivent être pris en compte. Cette approche doit être réalisée site par site car les coûts énergétiques pour le pompage et le refroidissement doivent être équilibrés.

La minimisation d'eaux usées peut être également favorisée par une gestion interne qui peut être basée de manière avantageuse sur un programme de gestion de l'eau.

2.9.2.2 Techniques de traitement

Toute quantité d'eau non-recyclable ou non-réutilisable doit être traitée afin de réduire au minimum la concentration de polluants comme les métaux lourds, les substances acides et les particules solides dans les effluents finaux rejetés dans le milieu aquatique. Pour réduire la concentration des polluants dans l'eau, des techniques de traitement, par exemple la précipitation chimique, la sédimentation ou la flottation et la filtration peuvent être employées. Ces techniques sont généralement utilisées conjointement dans une usine de traitement des eaux usées finale ou centrale sur site mais il est également possible de précipiter les métaux avant que les effluents du procédé ne soient mélangés à d'autres effluents.

2.9.2.2.1 Précipitation chimique

La précipitation chimique est principalement employée pour retirer les ions métalliques solubles de l'effluent liquide. Les métaux solubles peuvent être précipités à partir des eaux usées en réglant la valeur du pH. Un réactif tel que la chaux, l'hydroxyde de sodium, le sulfure de sodium ou une combinaison de réactifs, est ajouté à l'effluent et forme avec le métal un composé insoluble pour former un précipité. Ces composés insolubles peuvent alors être retirés de l'eau par filtration et sédimentation. Un coagulant ou un floculant qui aide à former des floes plus grands pouvant être séparés plus facilement est souvent ajouté pour améliorer la performance du système.

La précipitation est généralement employée pour retirer les métaux lourds d'un écoulement d'eaux usées comme le fer, le plomb, le zinc, le chrome, le manganèse, le molybdène etc. Les hydroxydes des métaux lourds sont généralement insolubles, ainsi la chaux est couramment employée pour les précipiter. De la même manière, les sulfures métalliques sont également insolubles et des réactifs comme le sulfure de sodium, le sulfure d'hydrogène de sodium et le tri-mercapto-sulfo-triazine (TMS) sont utilisés en conditions alcalines. Du sulfate ferrique peut être ajouté après la précipitation pour retirer le sulfure en excès. La précipitation du sulfure peut conduire à des concentrations beaucoup plus faibles dans l'effluent traité pour certains métaux en fonction du pH et de la température. Dans certains cas, la précipitation d'un mélange de métaux peut être réalisée en deux étapes ; premièrement avec de l'hydroxyde suivi d'une précipitation du sulfure [tm 171, Steil & Hahre 1999].

Afin de maximiser l'efficacité d'élimination du métal, le procédé doit être traité à différentes valeurs de pH avec différents réactifs. Le choix du réactif et de la valeur du pH est l'élément principal à prendre en compte pour la précipitation des métaux lourds. La solubilité est également affectée par la température et il convient de prendre ceci en compte.

Un autre facteur important est l'état de valence du métal dans l'eau. Par exemple, le chrome dont la forme hexavalente, le chromate, est nettement plus soluble que la forme trivalente. Dans ce cas, le chromate doit être réduit, généralement avec du SO_2 à faible pH, pour éliminer le chrome par un procédé de précipitation.

L'aspect final est la formation possible d'ions complexes qui sont généralement plus solubles. Cela est courant lorsque l'on traite des eaux usées contenant de l'ammoniac, du chlorure, du fluorure ou des cyanures avec les métaux lourds [tm 149, Kemmer 1987].

Dans de nombreuses installations où des métaux lourds sont éliminés, l'un des principaux problèmes pour atteindre les limites souhaitées dans l'effluent est l'état colloïdal des matières précipitées. Cela peut provenir d'une neutralisation et d'une floculation incorrectes. Différents floculants ou coagulants peuvent être employés pour améliorer l'état de la matière précipitée et les fournisseurs de ces matériaux sont en mesure de tester les précipités et de spécifier le coagulant approprié.

L'efficacité du traitement des eaux usées par précipitation chimique est principalement influencée par les facteurs suivants :

- le choix du précipitant chimique ;
- la quantité de précipitant ajoutée ;
- l'efficacité à laquelle le métal précipité est retiré de la solution ;
- le maintien du bon pH tout au long du procédé de traitement ;
- l'utilisation de sels de fer pour retirer les métaux spécifiques ;
- l'emploi de réactifs flocculants ou coagulants.

Composé	Eau de procédé de cuivre primaire et secondaire après traitement à la chaux et au sulfate de fer et sédimentation	Eau de procédé de cuivre secondaire et eau de surface après traitement au NaHS, sédimentation et filtration sur sable
pH	9,5	
Cu mg/l	0,2 – 0,5	0,04
Pb mg/l	0,2	0,04
Ni mg/l	0,5	0,07
Zn mg/l		0,13
As mg/l	0,1	< 0,01
Cd mg/l	0,1	0,004
Hg mg/l	0,05	
Les variations dans la composition des effluents sont prises en compte		

Tableau 2.17 : Concentration de certains métaux après traitement des eaux usées avec de la chaux ou du NaHS

Pour garantir une efficacité d'élimination maximale des métaux lourds, le facteur le plus important est la maintenance du choix du précipitant, le tableau ci-dessus montre que l'utilisation de réactifs à base de sulfure peut conduire à des concentrations plus faibles pour certains métaux. Un pH correct sur tout le procédé de traitement de l'effluent revêt également une importance capitale car certains des sels de métaux sont insolubles uniquement sur une plage très resserrée de valeurs de pH. En dehors de ces plages, l'efficacité d'élimination du métal baisse rapidement, par exemple le zinc va former un anion soluble, du zincate, à des valeurs de pH élevées [tm 12, HMIP Zn 1993].

2.9.2.2.2 Sédimentation

La sédimentation est une technique de séparation solide-liquide qui emploie la gravité pour séparer les complexes métalliques insolubles et les particules solides de l'effluent liquide. Elle peut avoir lieu dans différentes cuves de décantation comme des bassins de sédimentation, des étangs ou des réservoirs de sédimentation spécifiques (épaississants, clarifiants) avec un dispositif d'élimination des boues dans le fond du réservoir. Les bassins de sédimentation couramment utilisés sont rectangulaires, carrés ou circulaires sur une surface plane. La boue retirée lors de l'étape de sédimentation peut être déshydratée en utilisant par ex. un filtre-presse sous vide. Le filtrat généré peut être renvoyé au début du procédé de traitement des effluents ou vers la phase de procédé dans laquelle il a été généré en fonction du procédé de traitement. La sédimentation peut être employée pour séparer les particules solides des eaux usées qui ont été utilisées pour la granulation du laitier ou la production de grenailles.

La flottation peut constituer une alternative à la sédimentation. Les techniques de flottation sont employées pour séparer de l'effluent des flocs ou des particules flottantes de grande taille comme des pièces plastiques en les amenant à la surface de la suspension. La flottation peut être réalisée par une flottation à air dissous (DAF). L'air est dissous dans le milieu en suspension sous pression et sort de la solution lorsque la pression est libérée en minuscules bulles d'air fixées sur les particules en suspension. Cela fait flotter les particules à la surface et les flocs peuvent être alors facilement prélevés de la surface du liquide.

2.9.2.2.3 Filtration

Les techniques de filtration sont normalement employées pour la séparation solide/liquide et comme étape de clarification finale dans un procédé de traitement des eaux usées. L'unité de filtration est généralement située entre l'étape de sédimentation et le contrôle final pour retirer les solides transportés depuis l'étape de traitement précédente. La filtration peut avoir lieu dans différents systèmes filtrants en fonction des particules solides à retirer.

L'unité de filtre normale consiste en un lit de matériau(x) à travers lequel l'effluent liquide circule. Les particules fines qui ne peuvent pas passer à travers l'agent filtrant forment un gâteau de filtration qui doit être retiré en continu ou régulièrement par ex. par un lavage à contre-courant afin de maintenir la perte de charge à un bas niveau. Si la perte de charge est faible, cela permet d'alimenter l'unité de filtration par un écoulement des eaux usées par gravité.

Des filtres à sable sont conçus pour retirer mécaniquement les matériaux solides ou semi-solides en suspension par ex. les sédiments ou les hydroxydes métalliques. La purification des eaux usées par la filtration sur sable est réalisée par les effets combinés de la filtration, de la sorption chimique et de l'assimilation. Les filtres à sable fonctionnent parfois comme des cuves sous pression remplies de sable en couche, qui augmente en qualité avec la profondeur. Au départ, le gâteau de filtration peut améliorer l'efficacité de la filtration notamment pour les petites particules. Après un certain temps, il faut laver le lit de sable par contre-courant. Les filtres à sable sont souvent utilisés en tant qu'étape de finition pour un soutirage provenant d'un cycle d'eau fermé ou pour permettre à l'effluent d'être employé comme eau de procédé.

L'hyper-filtration ou osmose inverse est employée pour obtenir le résultat souhaité avec des particules très fines. L'hyper-filtration permet le passage de particules ayant une masse moléculaire d'environ 100 à 500, alors que l'ultra-filtration est utilisée dans la plage de 500 à 100 000.

L'ultra-filtration est une méthode simple et efficace de traitement des eaux usées mais elle exige beaucoup d'énergie. L'effluent est mis en contact avec une membrane d'ultra-filtration. Cette membrane qui comporte des pores de petite dimension, permet le passage de particules moléculaires comme l'eau et empêche les particules moléculaires plus grandes de passer. Avec une membrane très fine, il est même possible de filtrer des solutés aussi petits que les métaux. Les procédés de filtration basés sur des membranes produisent un perméat propre et concentré qui peut nécessiter un traitement supplémentaire.

2.9.2.2.4 Électrolyse

Les techniques électrolytiques sont employées pour éliminer des métaux tels que le cuivre, les métaux précieux, le chrome, le manganèse, le cadmium etc. des écoulements d'eau de procédé. Etant donné que les concentrations de métal sont généralement faibles, l'électrolyse est plus efficace avec les eaux usées avant que celles-ci ne soient diluées avec d'autres effluents. Des électrodes spéciales comme des électrodes en lit fluidisé ou des électrodes en trois dimensions peuvent être employées pour améliorer l'efficacité [tm 148, EA Technology 1998]. On obtient une efficacité maximale de la cellule lorsque la densité du courant change avec la concentration de soluté et que le transfert de masse a lieu à proximité de la densité de courant limite. En d'autres termes, la cathode doit toujours avoir une alimentation d'ions neuf pour qu'il y ait réduction.

Une alternative très efficace dans l'emploi des méthodes électrochimiques pour nettoyer le métal consiste à oxyder les métaux dans les effluents de façon à pouvoir les recycler. Un exemple est le traitement des effluents contenant du chrome (III). L'utilisation la plus répandue du chrome est celle en qualité d'agent oxydant où celui-ci dans son état d'oxydation (VI). Le sous-produit issu de l'oxydation est du chrome (III) qui est normalement rejeté avec les déchets. L'oxydation anodique de l'effluent de chrome (III) a été employée pour régénérer le chrome (VI) qui peut être réutilisé [tm 169, J.H. Clark 1995].

La différence de position relative dans la série électrochimique ou le potentiel redox des éléments peuvent également être exploités en contrôlant le courant et la tension d'une cellule électrolytique pour

recupérer les métaux plus nobles. Ces propriétés peuvent également être exploitées en utilisant la cémentation, par exemple, du cuivre peut être précipité en ajoutant du fer.

Une autre méthode de traitement électrochimique est l'électro-dialyse. La cellule d'électro-dialyse est constituée de deux électrodes séparées par une membrane d'échange d'ions. La théorie est assez simple. Les cations sous l'influence d'un potentiel d'électrode migrent à travers une membrane d'échange cationique où ils sont échangés contre des cations moins toxiques (par exemple échange du cadmium par du sodium). Cette méthode a pour but de combiner les avantages de l'échange d'ions à ceux du traitement électrochimique [tm 169, J.H. Clark 1995].

2.9.2.2.5 Osmose inverse

L'osmose inverse est utilisée extensivement pour retirer les métaux dissous, notamment dans le domaine de la galvanoplastie. L'osmose est la diffusion naturelle d'un solvant tel que l'eau provoquée par la différence de concentration de deux solutions séparées par une membrane. Le solvant circule dans la direction qui va réduire la concentration de la solution la plus concentrée. Dans l'osmose inverse, une force d'entraînement est appliquée pour inverser le flux du solvant. Une différence de pression appliquée entre les compartiments séparés par la membrane fait couler l'eau de la solution la plus concentrée vers la plus diluée. La pression nécessaire doit dépasser la pression osmotique. Le tableau suivant présente les données types du passage d'ions à travers la membrane d'osmose inverse. L'osmose inverse est parfois employée pour récupérer les métaux précieux dans le secteur des revêtements métalliques.

Ions	% de passage	% de rejet
Ammonium	8	92
Sodium	5	95
Potassium	5	95
Magnésium	3	97
Strontium	3	97
Calcium	2	98
Nitrate	15	85
Bisilicate	10	90
Chlorure	5	95
Fluorure	5	95
Bicarbonate	5	95
Sulfate	3	97
Phosphate	1	99

Tableau 2.18 : Passage type d'ions à travers la membrane d'osmose inverse

[tm 149, Kemmer 1987]

2.9.2.2.6 Échange d'ions

L'échange d'ions est parfois employé comme phase de traitement final pour retirer les métaux lourds des eaux usées d'un procédé. Avec l'échange d'ions, les ions métalliques indésirables peuvent être retirés d'un écoulement d'eaux usées en les transférant sur une matrice solide tout en fournissant en retour un nombre équivalent d'ions stockés sur le squelette de l'échangeurs d'ions. Le procédé d'échange d'ions est généralement utilisé si la concentration de métal est inférieure à 500 mg/l.

Le procédé d'échange d'ions a normalement lieu dans une colonne qui est garnie avec des grains de la résine échangeuses d'ions. L'échange commence d'abord sur la partie haute de la colonne puis traverse la colonne afin de maintenir les conditions d'échange à l'équilibre. En fonction de la quantité d'ions stockés sur le squelette, la capacité de l'échangeur d'ions est limitée. Il est donc recommandé que l'échangeur d'ions soit régénéré avec de l'acide chlorhydrique ou de la soude caustique. Dans certains cas, comme l'élimination de sélénium et de rhénium des effluents gazeux d'un four de grillage de

molybdénite, les échangeurs d'ions sont régulièrement remplacés de façon à ce que le métal puisse être récupéré pour eux-mêmes ou des installations spécialisées.

Certains échangeurs d'ions spécifiques sont capables de retirer des métaux spécifiques des eaux usées. Ce procédé d'échange d'ions sélectif est beaucoup plus efficace pour retirer les métaux toxiques de l'effluent. En outre, la colonne est capable d'atteindre un très haut degré de traitement lui-même en mesure de fonctionner efficacement dans des effluents au contenu mélangé.

2.9.2.2.7 Charbon actif

Le charbon actif, une substance carbonée hautement poreuse, est généralement employée pour retirer les matières organiques des eaux usées mais trouve également des applications dans l'élimination du mercure et des métaux précieux. Ces filtres sont généralement employés sous forme de lits ou de cartouches multiples de façon à ce que si un filtre est percé, un second prenne le relais. Le filtre usagé est alors remplacé et devient le filtre en aval. Cette opération repose sur une méthode adéquate pour détecter les filtres percés.

2.9.2.3 Techniques de régulation des procédés pour le traitement des effluents

Le fonctionnement et la régulation des procédés se sont développés récemment dans ce domaine. Les techniques suivantes sont employées [tm 106, Farrell F 1998]:

- Les systèmes de dosage des réactifs sont utilisés de manière extensive.
- Régulation par microprocesseur de l'alimentation en réactif et de la performance de l'installation. Surveillance en ligne de la température, de la turbidité, du pH, de la conductivité, de l'OXYDORÉDUCTION, du COT, des métaux individuels et du débit.
- Les opérateurs sont formés et évalués sur l'utilisation des instructions de fonctionnement et l'utilisation des techniques de contrôle modernes.
- L'optimisation des niveaux de supervision permet de tirer le meilleur profit de ces dispositions et de maintenir la responsabilité des opérateurs.
- Des systèmes de gestion environnementale et de la qualité sont employés.
- Des systèmes de maintenance robustes sont utilisés. On assiste à un recours croissant au personnel de maintenance dédié faisant partie des équipes.

2.9.3 Niveaux actuels de consommations et d'émissions

La composition des effluents liquides issus des méthodes pyrométallurgiques et hydrométallurgiques dépend essentiellement du métal produit, du procédé de production et de la matière première utilisée. Toutefois, les effluents liquides provenant d'une installation de production de métal contiennent normalement des métaux lourds, par ex. cuivre, plomb, zinc, étain, nickel, cadmium, chrome, arsenic, molybdène et mercure, et des solides en suspension.

Le tableau suivant fournit quelques exemples de taux de lavage pour différents écoulements d'eaux usées et procédés de production. La consommation de l'eau, la quantité et la composition de l'effluent liquide et les valeurs d'émission que l'on peut atteindre seront traitées plus en détail dans les chapitres réservés à chaque métal non-ferreux.

Source	Composé principal (mg/l)					
	Cu	Pb	As	Ni	Cd	Zn
Eau de procédé (100 000 m ³ /a)						
Avant traitement	2000	500	10 000	1000	500	1000
Après traitement	0,01-0,2	0,001-0,04	0,01-0,1	0,004-0,15	0,0001-0,1	0,01-0,2
Eau de précipitation						
Avant traitement	15-30	< 5	< 2	< 2	< 0,5	< 2
Après traitement	0,01-0,4	0,005-0,2	0,003-0,007	0,002-0,4	0,0002-0,1	0,03-0,4
Eau de refroidissement direct (16 000 000 m ³ /a)						
Avant traitement	< 3	< 0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,5
Après traitement	0,01-0,25	0,001-0,1	0,001-0,1	0,002-0,6	0,0001-0,003	0,02-0,5
Taux général de polluant (g/t de Cu produit)	2,3	0,3	0,23	0,1	0,05	0,8

Tableau 2.19 : Exemple de teneur en métal dans les eaux usées avant et après traitement dans un complexe de four de fusion/affinage du cuivre

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Composé	Source et méthode de traitement						
	Eau de procédé de cuivre primaire + secondaire. Traitement à la chaux et au sulfate de fer, sédimentation	Eau de procédé de cuivre secondaire et eau de surface après traitement au NaHS, sédimentation et filtration sur sable	Eau de refroidissement direct après rectification du pH et sédimentation	Eau d'écoulement de surface après rectification du pH et sédimentation	Eau de procédé de production de fil de cuivre après traitement	Eau de procédé de demi-produit de cuivre après traitement	Eau de procédé de demi-produit d'alliage de cuivre après traitement
pH	9,5		8,5-9,5	6,5-8,5	6,5-9,5	6,5-9,5	6,5-9,5
Cu mg/l	0,2-0,5	0,04	0,01-0,25	0,01-0,4	0,2-0,3	0,3-0,4	0,2-0,4
Pb mg/l	0,2	0,04	0,001-0,1	0,005-0,2		0,02-0,03	0,2-0,3
Ni mg/l	0,5	0,07	0,002-0,06	0,002-0,4		0,09-0,1	0,3-0,4
Zn mg/l		0,13	0,02-0,5	0,03-0,4		0,7-0,8	0,8-1,0
As mg/l	0,1	< 0,01	0,001-0,1	0,003-0,07		0,01-0,03	<0,1
Cd mg/l	0,1	0,004	0,0001-0,003	0,0002-0,1		0,001	<0,2
Hg mg/l	0,05						<0,05
Huile ou hydrocarbures mg/l					< 10	< 10	< 10
Solides en suspension mg/l					< 5	< 100	< 100
Les indications tiennent compte des variations dans la composition des effluents							

Tableau 2.20 : Traitement de certains écoulements usagés dans la production de cuivre

Une vue d'ensemble de certaines sources d'eaux usées et des méthodes de réduction et de traitement est fournie ci-dessous.

Source d'eau usée	Métaux associés produits	Méthodes de réduction	Méthodes de traitement
Eau de procédé	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'alumine • Cassage de batterie plomb-acide • Stripping 	<ul style="list-style-type: none"> • Retour vers le procédé autant que possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation et précipitation • Électrolyse
Eau de refroidissement indirect	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement du four pour la plupart des métaux • Refroidissement par électrolyte pour le Zn 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un système de refroidissement étanche • Surveillance du système pour détecter les fuites 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation
Eau de refroidissement direct	<ul style="list-style-type: none"> • Coulées de Cu & d'Al • Électrodes de carbone • Ferroalliages • chrome métal 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation ou autre traitement • Système de refroidissement fermé 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation • Précipitation si nécessaire
Granulation du laitier	<ul style="list-style-type: none"> • Cu, Ni, Pb, métaux précieux, ferroalliages 	<ul style="list-style-type: none"> • Réutilisation dans un système étanche 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation • Précipitation si nécessaire
Électrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • Cu, Ni, Zn, Mg 	<ul style="list-style-type: none"> • Système étanche • Extraction électrolytique de la purge d'électrolyte 	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralisation et précipitation
Hydrométallurgie (sous pression)	<ul style="list-style-type: none"> • Zn, Cd 	<ul style="list-style-type: none"> • Système étanche • Traitement sous pression 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation • Précipitation si besoin
Système de dépollution (sous pression)	<ul style="list-style-type: none"> • Laveurs humides • Electrofiltre humide et laveurs pour unités de fabrication d'acide. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réutilisation du traitement sous pression des écoulements d'acide faible si possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation • Précipitation si nécessaire
Eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Tous 	<ul style="list-style-type: none"> • Stockage approprié des matières premières 	<ul style="list-style-type: none"> • Décantation • Précipitation si nécessaire • Filtration

Tableau 2.21 : Vue d'ensemble des écoulements d'eaux usées

2.9.4 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Comme il a déjà été expliqué, toutes les méthodes de traitement des eaux usées constituent également des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. La meilleure technique de traitement disponible ou une combinaison des différentes méthodes de traitement ne peut être choisie qu'en fonction du site en tenant compte des facteurs spécifiques à celui-ci. Les facteurs les plus importants dont il faut tenir compte qui dans un cas précis constitueraient la meilleure solution pour minimiser la quantité d'eaux usées et la concentration de polluants sont les suivants :

- le procédé dans lequel les eaux usées sont générées,
- la quantité d'eau,
- les polluants et leurs concentrations,
- le niveau de traitement requis, c'est-à-dire les normes locales et nationales relatives à la qualité de l'eau,
- La disponibilité des ressources en eau.

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients des techniques de traitement les plus courantes [tm 169, J.H.Clark, 1995].

Technique de traitement	Avantages	Inconvénients
Précipitation	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple et bon marché • Long passé d'utilisation réussie • Ne nécessite pas de frais important dans une nouvelle installation • Capable de traiter une large gamme de contaminants de métaux notamment si une précipitation à deux étapes avec des réactifs d'hydroxyde puis de sulfure est utilisée • Dans les conditions appropriées, peut fournir une excellente élimination des métaux • Les précipitants spécifiés sont disponibles dans le commerce • Permet la précipitation par absorption • Les précipités peuvent souvent être renvoyés vers la charge 	<ul style="list-style-type: none"> • Les effluents acides peuvent être difficiles à traiter • Non sélective : fournit une boue à haute teneur en eau contenant un mélange de métaux toxiques et non toxiques • Il peut être nécessaire de mettre la boue en décharge, avec des coûts parfois importants • La présence d'autres sels, d'agents complexants organiques et de solvants peut gravement compromettre l'efficacité de la précipitation • Ne peut pas toujours être utilisée pour traiter de faibles concentrations de métaux • Certains hydroxydes sont précipités de manière inefficace
Sédimentation	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple et bon marché • Long passé d'utilisation réussie • 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne peut retirer que les particules solides • Pour les particules avec une légère différence de densité pour la sédimentation dans l'eau, des bassins longs et larges sont nécessaires
Filtration	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple et bon marché • Long passé d'utilisation réussie • La filtration, par ex. les filtres à sable, sont utilisés au mieux pour une matière particulaire connue 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne peut retirer que les particules solides • L'efficacité de la filtration baisse si les particules sont très petites • L'efficacité de la filtration baisse si la vitesse augmente
Flottation	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple et bon marché • Long passé d'utilisation réussie • 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne peut retirer que les complexes de particules solides flottables • L'air doit d'abord être dissous dans de l'eau pressurisée pour être dispersé dans l'eau
Ultrafiltration	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple • Les particules très fines, même les molécules, peuvent être retirées des eaux usées • Les membranes très fines vont également filtrer des solutés aussi petits que des métaux • Pratiquement aucune émission de particules 	<ul style="list-style-type: none"> • Débit et vitesse de filtration limités • Les membranes peuvent se décomposer rapidement dans des effluents corrosifs • Pas de séparation des métaux • Les membranes anciennes peuvent fuir • Les membranes peuvent être rapidement encrassées
Électrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être utilisée pour récupérer et recycler les métaux • Peut être utilisée pour traiter les effluents contenant des métaux concentrés (env. 2 g/l) en une seule étape • Technologie la plus disponible • Essayée et testée avec de bons résultats dans le domaine de l'électrolyse • Peut être employée pour traiter les contaminants organiques simultanément • Peut être employée en modes d'écoulement discontinu ou continu 	<ul style="list-style-type: none"> • Le niveau de traitement au-delà de ppm est difficile • Les cellules qui sont inefficaces sont chères à maintenir et à utiliser • Les potentiels électriques élevés constituent des dangers • L'électrolyse n'est pas sélective • Nécessite une surveillance constante • Insatisfaisante pour traiter des effluents à teneur variable et volume élevé

Tableau 2.22 : a) Résumé des avantages et inconvénients des techniques courantes de traitement des eaux usées

Technique de traitement	Avantages	Inconvénients
Électro-dialyse	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être utilisée pour récupérer et recycler les métaux • L'électro-dialyse peut être sélective • L'électro-dialyse est déjà employée pour la désalination et la galvanoplastie • L'électro-dialyse est capable d'atteindre un niveau de traitement inférieur au ppm 	<ul style="list-style-type: none"> • L'électro-dialyse souffre des mêmes inconvénients que les méthodes d'échange d'ions (par exemple membrane encrassée) • Nécessite une surveillance constante • Insatisfaisante pour traiter des effluents à teneur variable et volume élevé
Osmose inverse	<ul style="list-style-type: none"> • Pratiquement aucune émission • La technologie existe et est disponible dans le commerce • Peut être employée pour recycler les métaux • Peut être employée en modes discontinu ou continu • Capable de traiter une large gamme de concentrations de métaux • Peut être utilisée pour éliminer les organiques de l'effluent • Son efficacité ne dépend pas énormément de la concentration de contaminants non-corrosifs dans l'effluent 	<ul style="list-style-type: none"> • Débit et vitesse de filtration limités • Les membranes peuvent se décomposer rapidement dans des effluents corrosifs • Pas de séparation des métaux • Les membranes anciennes peuvent fuir • Les membranes peuvent être rapidement encrassées • Les membranes ont besoin d'être surveillées et remplacées fréquemment • L'équipement est spécialisé et coûteux • L'osmose inverse utilise une pression élevée • Restreinte à un débit minimal d'environ 200 l/min
Échange d'ions	<ul style="list-style-type: none"> • Relativement peu cher • Produits disponibles dans le commerce • Essayé et testé dans des applications industrielles (par ex. élimination et récupération du rhénium et du sélénium) • Capable de traiter au niveau des ppb (l'échange d'ions sélectif est capable de la réaliser en niveau de ppt) • Peut être facilement utilisé en liaison avec d'autres techniques (précipitation par ex.) comme partie d'une installation de traitement des eaux usées intégrée • Peut être sélectif pour les métaux lourds • Peut être appliqué à différents types d'écoulements : intermittent, continu, volume relativement grand • L'échange d'ions sélectif a été employé dans des cas isolés comme le traitement des effluents du nucléaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne peut pas prendre en charge des concentrations importantes de métal • La matrice peut être facilement encrassée par des solides et certaines matières organiques • L'échange d'ions traditionnel n'est pas sélectif • L'échangeur usagé doit généralement être mis en décharge comme déchet toxique • Les matrices peuvent se décomposer avec le temps • La performance est sensible au pH de l'effluent • Les effluents avec un volume important nécessitent de très grandes colonnes d'échanges d'ions • L'échange d'ions sélectif ne connaît pas d'usage industriel extensif à ce jour • La régénération des colonnes d'échange d'ions sélectif prend du temps • Des temps de contact longs avec l'effluent peuvent être nécessaires • •
Charbon actif	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être employé pour une large gamme d'applications (par ex. élimination du mercure ou des dioxines des effluents) • Peut être ajouté après coagulation et sédimentation dans une couche de filtres à sable • La technologie existe et est disponible dans le commerce 	<ul style="list-style-type: none"> • Le charbon actif est onéreux • Le charbon actif peut devenir un terrain de croissance pour les micro-organismes • Emissions élevées de SO₂ générées par le procédé de chauffage pour la transformation du carbone en charbon

Tableau 2.23 : b) Résumé des avantages et inconvénients des techniques courantes de traitement des eaux usées

2.10 Minimisation et manutention des déchets

2.10.1 Résidus et déchets provenant de la production des métaux non-ferreux

La production de métaux non-ferreux à partir des matières premières et secondaires génère une grande quantité de sous-produits, de produits intermédiaires et de résidus. Ces résidus proviennent de différentes étapes du procédé de production telles que les opérations métallurgiques, le procédé de première fusion ainsi que le traitement des effluents gazeux et des eaux usées [tm 85, MURL Düsseldorf 1997]. Le contenu et la valeur des éléments présents dans le résidu influencent son potentiel de réutilisation par ex. la boue anodique est une matière première viable pour la récupération des métaux précieux. Toute désignation d'un résidu comme déchet pour une mise en décharge tient compte de cela. Ainsi, certaines poussières sous filtre comme les fumées de silice qui sont produites par le procédé de première fusion du ferrosilicium et de silicium-métal sont recommandées aujourd'hui comme sous-produit.

Selon la législation actuelle de l'UE, une grande partie de ces résidus est considérée comme des déchets. Toutefois, le secteur des métaux non-ferreux utilise depuis des décennies de nombreux résidus comme matières premières pour d'autres procédés et un réseau étendu d'opérateurs en métallurgie a été établi depuis longtemps pour augmenter la récupération des métaux et réduire les quantités de déchets destinés à la mise en décharge. Il a été rapporté que certaines mesures législatives pour contrôler les mouvements des déchets empêchent de recycler les résidus provenant des opérations métallurgiques [tm 99, Bontoux 1997]. Il est également bien connu que les secteurs produisant des métaux obtiennent l'un des meilleurs taux de recyclage de tous les secteurs industriels. Cela aide à réduire les effets croisés à un minimum. Néanmoins, le problème des résidus provenant des installations de production et la désignation de certains de ces matériaux joueront un rôle important dans les autorisations futures et les techniques ont tendance à se centrer sur cet aspect.

Le tableau suivant montre des exemples de déchets potentiels selon le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil 94/3/CEE)¹ et la Liste des déchets dangereux (Décision du Conseil 94/904/CEE). D'une manière générale, les déchets sont définis par la directive relative aux déchets (Directive 75/442 CEE amendée par la Directive 91/156/CEE) comme « toute substance ou tout objet qui relève des catégories figurant à l'annexe I dont le détenteur se défait ou a l'intention de se défaire ou a l'obligation de se défaire ». Une seconde définition des déchets co-existe avec la définition présentée ci-dessus. Il s'agit de celle de la Convention de Bâle adoptée par l'Union européenne en 1993 : « Les déchets sont des substances ou objets qu'on élimine, qu'on a l'intention d'éliminer ou qu'on est tenu d'éliminer en vertu des dispositions du droit national » [tm 99, Bontoux 1997].

Déchets provenant de la production des métaux non-ferreux			
Code CED	Description	Déchets dangereux	Origine
01 03 03	Boues rouges issues de la production d'alumine.		Transformation de bauxite
10 03 00	Déchets de la pyrométallurgie de l'aluminium.		
10 03 01	Goudrons et autres déchets carbonés provenant de la fabrication des anodes.	•	Unité de cuisson d'anode
10 03 02	Déchets d'anode		Salle des cuves
10 03 03	Résidus d'écémage	•	Fusion
10 03 04	Laitier de première fusion / scories blanches	•	Fusion
10 03 05	Poussière d'alumine		Fusion
10 03 06	Bandes de carbone usagé et matériaux ignifuges provenant de l'électrolyse.		Unité de cuisson d'anode
10 03 07	Vieilles brasques.	•	Salle des cuves
10 03 08	Laitier salin de seconde fusion.	•	Fusion

¹ Le CED est une liste harmonisée, non-exhaustive des déchets, c'est-à-dire une liste qui est révisée périodiquement et si nécessaire révisée conformément à la procédure du comité. Toutefois, l'inclusion d'un matériau dans le CED ne signifie pas que ce matériau est un déchet en toutes circonstances. L'entrée ne s'applique que lorsque la définition de déchet a été satisfaite [tm 99, Définition de Déchet 1997].

Déchets provenant de la production des métaux non-ferreux			
Code CED	Description	Déchets dangereux	Origine
10 03 09	Scories noires de seconde fusion.	•	Fusion
10 03 10	Déchets provenant du traitement des scories salines et des crasses noires	•	Unité de récupération des scories salines
10 03 11	Poussières de filtration des fumées.		Système de dépollution
10 03 12	Autres particules et poussières (y compris poussières de broyage de crasses).		Fraisage, stockage
10 03 13	Déchets solides provenant de l'épuration des fumées.		Système de dépollution
10 03 14	Boues provenant de l'épuration des fumées.		Système de dépollution
10 03 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
10 04 00	Déchets provenant de la pyrométallurgie du plomb.		
10 04 01	Laitiers (première et seconde fusions).	•	Fusion
10 04 02	Scories et résidus d'écramage (première et seconde fusions).	•	Fusion
10 04 03	Arséniate de calcium.	•	Système de dépollution
10 04 04	Poussière de filtration des fumées.	•	Système de dépollution
10 04 05	Autres particules et poussières.	•	Stockage, manutention
10 04 06	Déchets solides provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 04 07	Boues provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 04 08	Garnissages et réfractaires usagés.		Four
10 04 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
10 05 00	Déchets provenant de la pyrométallurgie du zinc.		
10 05 01	Scories (première et seconde fusions).	•	Fusion
10 05 02	Scories et résidus d'écramage (première et seconde fusions).	•	Fusion
10 05 03	Poussière de filtration des fumées.	•	Système de dépollution
10 05 04	Autres particules et poussières		Stockage, manutention
10 05 05	Déchets solides provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 05 06	Boues provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 05 07	Garnissages et réfractaires usagés.		Four
10 05 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
10 06 00	Déchets provenant de la pyrométallurgie du cuivre.		
10 06 01	Scories (première et seconde fusions).		Fusion
10 06 02	Scories et résidus d'écramage (première et seconde fusions).		Fusion
10 06 03	Poussières de filtration des fumées.	•	Système de dépollution
10 06 04	Autres particules et poussières.		Stockage, manutention
10 06 05	Déchets du raffinage électrolytique.	•	Salle de la cuve
10 06 06	Déchets solides provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 06 07	Boues provenant de l'épuration des fumées.	•	Système de dépollution
10 06 08	Garnissages et réfractaires usagés.		Four
10 06 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
10 07 00	Déchets provenant de la pyrométallurgie de l'argent, de l'or et du platine.		
10 07 01	Laitiers (première et seconde fusions).		Fusion
10 07 02	Scories et résidus d'écramage (première et seconde fusions).		Fusion
10 07 03	Déchets solides provenant de l'épuration des fumées.		Système de dépollution
10 07 04	Autres particules et poussières.		Stockage, manutention
10 07 05	Boues provenant de l'épuration des fumées.		Système de dépollution
10 07 06	Garnissages et réfractaires usagés.		Four
10 07 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
10 08 00	Déchets provenant de la pyrométallurgie d'autres métaux non ferreux.		
10 08 01	Laitiers (première et seconde fusions).		Fusion
10 08 02	Scories et résidus d'écramage (première et seconde fusions).		Fusion
10 08 03	Poussières de filtration des fumées.		Système de dépollution
10 08 04	Autres particules et poussières.		Stockage, manutention, traitement du métal pulvérulent
10 08 05	Boues provenant de l'épuration des fumées.		Système de dépollution
10 08 06	Garnissages et réfractaires usagés.		Four
10 08 99	Déchets non spécifiés ailleurs.		
11 02 00	Déchets et boues provenant des procédés hydrométallurgiques des métaux non-ferreux.		
06 05 01	Boues provenant du traitement des eaux usées		Traitement des eaux usées
11 02 01	Boues provenant de l'hydrométallurgie du cuivre.		Procédé de lixiviation
11 02 02	Boues provenant de l'hydrométallurgie du zinc (y compris jarosite et goéthite).	•	Procédé de lixiviation
11 02 03	Déchets provenant de la production d'anodes pour les procédés d'électrolyse en phase aqueuse.		Unité de production d'anode
11 02 04	Boues non spécifiées ailleurs.		
13 01 00	Huiles hydrauliques et liquides de freins usagés.		
13 01 01	Huiles hydrauliques contenant des PCB ou des PCT.	•	Transformateur

Déchets provenant de la production des métaux non-ferreux			
Code CED	Description	Déchets dangereux	Origine
13 01 02	Autres huiles hydrauliques chlorées (hors émulsion).	•	Transformateur
13 01 03	Huiles hydrauliques non chlorées (hors émulsion).	•	Transformateur
13 01 06	Huiles hydrauliques contenant seulement des huiles minérales.	•	Transformateur
13 03 00	Huiles isolantes, fluides caloporteurs et autres liquides usagés.		
13 03 01	Huiles isolantes, fluides caloporteurs et autres liquides.	•	Transformateur
13 03 02	Autres huiles isolantes chlorées et autres liquides contenant des PCB ou des PCT.		Transformateur
13 03 03	Huiles isolantes, fluides caloporteurs et autres liquides non chlorés.	•	Transformateur
13 03 04	Huiles isolantes, fluides caloporteurs et autres liquides de synthèse.	•	Transformateur
13 03 05	Huiles isolantes et fluides caloporteurs d'origine minérale.	•	Transformateur
15 02 00	Absorbants, matériaux filtrants, chiffons d'essuyage et vêtements de protection.		
15 02 01	Absorbants, matériaux filtrants, chiffons d'essuyage, vêtements de protection.		Système de dépollution (dépoussiérage à sec)

Tableau 2.24 : Matériaux provenant de la production des métaux non-ferreux

La plupart des matériaux listés ci-dessus sont recyclés ou réutilisés au sein du secteur des métaux non-ferreux lui-même ainsi que par d'autres secteurs par exemple pour la fabrication de ciment, des abrasifs et dans le bâtiment. Il n'y a pas intention de les éliminer ou de les mettre en décharge. Ils sont le résultat de la séparation des métaux nécessaire à leur récupération et à la production de métaux purs provenant de sources complexes. Quelques exemples sont fournis ci-dessous.

2.10.2 Procédés et techniques appliqués

2.10.2.1 Résidus du procédé de première fusion

Les principaux résidus issus de la première fusion des métaux non-ferreux sont le laitier, les scories les résidus d'écumage retirés durant les procédés pyrométallurgiques. Le laitier est généré par la réaction des éléments d'accompagnement formant du laitier (par ex. Fe) avec des fondants ajoutés. Dans le procédé de première fusion, le laitier est liquide et possède une densité différente de celle du métal fondu et peut par conséquent être soutiré séparément.

La plupart du laitier généré par les opérations en aval ou d'affinage dans les procédés de production de métaux non-ferreux peut généralement être recyclée ou réutilisée pour la récupération ultérieure des métaux. La figure suivante montre le recyclage interne du laitier produit pendant la production du cuivre primaire. Dans cet exemple, le laitier fondu obtenu en sortie du convertisseur, qui a une teneur en cuivre élevée, est renvoyé au four de fusion. Le laitier qui quitte le four de fusion est décuivré dans un four électrique de traitement du laitier. Ce four fonctionne en continu avec un débit de laitier presque continu. En fonction des installations locales, le laitier propre obtenu est soit granulé pour produire des abrasifs, soit refroidi lentement et concassé en morceaux servant de matériau de construction ou de remblayage.

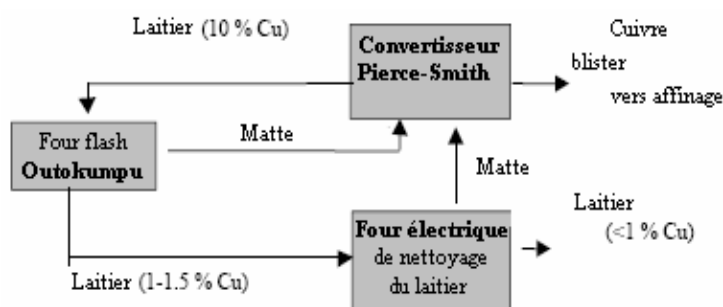


Figure 2.41 : Traitement au four électrique des laitiers de cuivre

Il faut distinguer le laitier avec une teneur en métal élevée qui est recyclé au sein du procédé, du laitier final avec une teneur en métal faible. Plusieurs usines du secteur des métaux non-ferreux ont démontré qu'il existe un marché sur lequel elles sont en mesure de vendre le laitier pour une autre utilisation avantageuse. L'utilisation du laitier comme matériau de construction n'est possible que si la quantité des composés métalliques pouvant être lixiviés est faible. Différents tests permettent d'en faire la démonstration. Le laitier qui ne peut pas être employé comme abrasif ou dans le génie civil et le bâtiment est envoyé pour une mise en décharge finale.

Le laitier salin est généré par la fusion de métaux légers (aluminium, magnésium). L'utilisation de flux salins évite que le métal fondu ne s'oxyde et lie les impuretés issues du procédé. Il existe différentes manières de minimiser la quantité de flux salins utilisés ainsi que différentes techniques de traitement pour récupérer les sels et les métaux disponibles et celles-ci sont traitées en détail dans le Chapitre 4 du présent document.

Les scories et les résidus d'écémage sont générés par l'oxydation des métaux à la surface du bain ou par réaction avec du matériau ignifuge utilisé pour garnir les fours. La teneur métallique des résidus d'écémage est relativement élevée (entre 20 et 80%), par conséquent, ils peuvent être normalement recyclés vers le procédé principal ou fournis comme matière première secondaire à d'autres usines de métaux non-ferreux.

Les garnissages et réfractaires usagés constituent une autre source de résidus. Ils proviennent des morceaux de matériaux réfractaires des garnissages de four ou lorsqu'un garnissage a été entièrement renouvelé. La durée de vie d'un garnissage de four varie de quelques semaines à plusieurs années en fonction du procédé et du métal (par ex. pour le four flash Outokumpu dans la production du cuivre primaire, elle peut être de 6 à 10 ans). La quantité de matériau de garnissage de four pourrait augmenter jusqu'à 5 kg/t de métal produit en fonction du métal fondu [tm 85, MURL Düsseldorf 1997]. Les pratiques suivantes sont employées pour les garnissages de four : traitement dans un four de fusion pour former un laitier inerte, par ex. les garnissages d'un procédé de fusion du laiton sont envoyés directement vers un four de fusion de cuivre secondaire disponible localement; utilisation comme composant dans la masse du trou de coulée ; mise en décharge des garnissages inertes. Le tableau suivant fournit une vue d'ensemble de la quantité des résidus recyclés, réutilisés et mis en décharge de certains fours de fusion de métaux non-ferreux en Allemagne. Dans ce sens, le recyclage signifie que le résidu est renvoyé au procédé d'où il a été produit. La réutilisation signifie que le résidu est utilisé à d'autres fins par ex. le laitier peut être réutilisé comme matériau de construction.

Résidu	Quantité de résidus déclarée en tonnes pour 1996		
	Recyclée ou réutilisée	Mise en décharge	Total
Déchets réfractaires (dioxyde de silice)	21	188	209
Déchets réfractaires	1655	1145	2800
Déchets réfractaires avec composés nocifs	637	728	1365
Laitier	16 869	3	16 871
Scories provenant de la fusion du plomb	1903	0	1903
Aluminium contenant des résidus d'écémage	45 904	927	46831
Magnésium contenant des scories	615	81	696
Laitier salin provenant de la fusion de l'aluminium	112 438	0	112 438
Autres résidus	348	0	348

Tableau 2.25 : Quantité de résidus recyclés, réutilisés et mis en décharge qui ont été déclarés en 1996 pour certaines usines de métaux non-ferreux en Rhénanie du Nord-Westphalie

[tm 83, MURL Düsseldorf 1999]

2.10.2.2 Résidus provenant des systèmes de dépollution

Le système de dépollution constitue une autre source importante de matériaux solides. Il s'agit des poussières des gaz d'évacuation et des boues récupérées par l'équipement de contrôle de la pollution de l'air ainsi que d'autres déchets solides comme le matériau filtrant usagé.

Les poussières provenant du stockage et de la manutention des matières premières ou des unités de prétraitement sont captées par le système de dépoussiérage (généralement un filtre à manches) et renvoyées au procédé principal ou à un autre four de fusion. Dans certains cas, les poussières doivent être agglomérées de façon à pouvoir être recyclées vers la station de stockage et de manutention des matières premières.

Les effluents gazeux chargés en poussières issus de la première fusion et les installations d'affinage peuvent être traités (comme décrit dans la section 2.8) en employant différentes techniques de dépollution. Les matières captées comme poussières lors du traitement des effluents gazeux peuvent être agglomérées et renvoyées au four de fusion ou fournies comme matière première pour une récupération ultérieure des métaux dans d'autres installations. Un exemple est la poussière riche en zinc issue du convertisseur d'un four électrique de traitement du laitier dans le procédé de fusion du cuivre primaire qui peut être traitée comme sous-produit et réutilisée comme matière première dans une installation de récupération du zinc [tm 92, Cuivre Expert Group 1998]. Un autre exemple est l'emploi de fumées de silice (microsilice) qui sont captées dans le filtre à manches par fusion de silicium-métal ou de ferro-silicium et vendues comme sous-produit de valeur au secteur du bâtiment.

Les boues contenant du métal provenant d'un laveur sont généralement évacuées par exemple dans un filtre-pressé et renvoyées vers le four de fusion.

Lorsque le traitement des effluents gazeux a lieu dans un système de dépoussiérage par voie sèche, le matériau filtrant a parfois besoin d'être remplacé. Les filtres contiennent des composés et des particules métalliques provenant du procédé. Il existe de nombreux exemples où des matériaux filtrants sont employés dans le procédé pyrométallurgique. Si cela n'est pas possible, ils sont envoyés dans un incinérateur ou une décharge pour élimination ultime. Le tableau suivant fournit des informations sur la quantité de résidus recyclés, réutilisés ou mis en décharge provenant des systèmes de dépollution dans certaines usines de métaux non-ferreux en Allemagne.

Résidu	Quantité de résidus déclarée en tonnes pour 1996		
	Recyclée ou réutilisée	Mis en décharge	Total
Poussières contenant des métaux non-ferreux	6 550	1 886	8 436
Poussières	201	13	214
Résidus minéraux provenant du système de dépollution	2 638	1 752	4 390
Boues	508	4	511
Poussières contenant de l'aluminium	1 477	66	1 543

Tableau 2.26 : Quantité de résidus recyclés, réutilisés et mis en décharge qui ont été déclarés en 1996 pour certaines usines de métaux non-ferreux en Rhénanie du Nord-Westphalie
[tm 84, MURL Düsseldorf 1999]

2.10.2.3 Résidus provenant du traitement des effluents liquides

Les procédés pyrométallurgiques pour la production des métaux non-ferreux ne produisent normalement pas d'eaux usées nocives. L'eau est utilisée pour le refroidissement direct ou indirect des fours, des lances de soufflage et des machines de coulée par ex. pour la coulée de d'anodes de cuivre ou la coulée continue. Cette eau est chauffée lors du refroidissement de l'équipement mais n'est normalement pas polluée par des impuretés chimiques ou des particules métalliques. Par conséquent, l'eau de refroidissement est généralement évacuée vers la source réceptrice directement après

décantation ou une autre phase de traitement. Les matériaux solides retirés sont renvoyés dans le four de première fusion.

Si un laveur humide est employé pour nettoyer les effluents gazeux de procédé, des eaux usées sont générées. Cet écoulement d'eaux usées doit être traité pour réduire la quantité de composés métalliques. Ce traitement produit des boues qui peuvent être riches en métal et peuvent parfois être recyclées vers le procédé si la teneur en métal est suffisamment élevée.

Les eaux de procédé sont produites par les opérations hydrométallurgiques et présentent un risque élevé de pollution de l'eau. Elles doivent donc être traitées dans une usine de traitement des eaux usées. Le traitement est réalisé par neutralisation ou précipitation des ions spécifiques. Les principaux résidus provenant de ces systèmes de traitement des effluents sont le gypse (CaSO_4), les hydroxydes et les sulfures métalliques. Les boues sont parfois recyclées en étant renvoyées dans le procédé de production principal lorsque la neutralisation ne présente pas de purge pour des éléments mineurs mais plus généralement, elles sont mises en décharge.

2.10.2.4 Résidus provenant des procédés hydrométallurgiques de métaux non-ferreux

La production de métaux non-ferreux par des procédés hydrométallurgiques constitue une autre source majeure de résidus solides. Le procédé de lixiviation peut produire des quantités relativement importantes de boues (par ex. environ 0,3 à 0,5 tonnes de solides à base de fer par tonne de zinc en fonction de la qualité du concentré). Ces résidus sont normalement mis en décharge dans des bassins spécialement étanches.

Le procédé de lixiviation et de purification et les procédés d'électrolyse génèrent également d'autres solides riches en métaux. Ils sont généralement riches en un métal spécifique et peuvent parfois être recyclés vers le procédé de production ou envoyés pour la récupération de métal vers d'autres installations de métaux non-ferreux (par ex. pour la production de métaux précieux, de plomb, de cuivre et de cadmium). Les boues anodiques provenant des cuves de production du cuivre par exemple constituent l'une des matières premières les plus importantes de la récupération des métaux précieux et sont par conséquent considérées comme un sous-produit de valeur de la production du cuivre. Ces questions sont traitées dans les chapitres relatifs aux groupes de métaux individuels.

2.10.2.5 Autres résidus provenant de la production des métaux non-ferreux

Il existe d'autres types de résidus comme les huiles hydrauliques et les fluides caloporteurs qui résultent de la maintenance régulière de l'équipement, par exemple, du transformateur des fours électriques. Ils sont généralement fournis à une installation de raffinage d'huiles usagées (ou dans certains pays par ex. l'Italie, vers un consortium ou une agence obligatoires). Dans certaines circonstances, ils peuvent être employés comme source d'énergie sur site.

2.10.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de bonnes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC.

2.10.3.1 Réduction des résidus provenant du procédé métallurgique

Comme mentionné dans la section 2.10.2.1, la quantité de scories et de résidus d'écémage qui sont produits par la première fusion des métaux est principalement influencée par les impuretés des matières premières, ainsi des matériaux plus propres réduisent la production de ces solides. Dans

certains cas, cela peut être assuré par la sélection de la matière première qui sera utilisée. Par exemple, certains concentrés de zinc peuvent contenir des quantités inférieures plus faibles de fer [tm 101,NL Zn 1998], et les procédés développés pour utiliser ces concentrés peuvent minimiser la production des résidus à base de fer. Leur disponibilité limitée et les coûts plus élevés de ces concentrés signifie que cela ne représente pas une solution globale. Pour l'aluminium secondaire, le prétraitement des déchets ou l'utilisation de matériaux plus propres a pour résultat la réduction ou l'élimination des flux salins utilisés en fonction du four utilisé. Les économies réalisées grâce au prétraitement doivent être comparées.

D'autre part, un stockage et une manutention inappropriés peuvent conduire à l'humidification des matériaux. Par exemple, dans un procédé de re-fusion de l'aluminium, l'eau est vaporisée, avec la conséquence d'une explosion.

La génération de résidus d'écumage doit être minimisée en optimisant le fonctionnement du four par ex. baisse de la combustion en évitant la surchauffe de la fusion. Des techniques de régulation modernes des procédés sont utilisées pour garantir des conditions de fonctionnement optimisées.

Pour éviter l'oxydation de la surface du bain en fusion, le four peut fonctionner en circuit fermé. Par exemple, fondre l'aluminium dans une atmosphère réductrice (rinçage du four avec du gaz inerte) réduit la quantité de résidus générés. De la même manière, un système de pompage et un puit latéral permettent également de réduire l'oxydation.

Comme il a été démontré, les cendres de plomb et une quantité importante du laitier généré par le procédé de fusion peuvent être recyclés ou réutilisés dans une large mesure.

Les garnissages et réfractaires usagés ne peuvent pas être complètement évités mais une réduction de leur quantité peut être obtenue avec les mesures suivantes :

- Construction soignée du garnissage en briques du four
- Utilisation du four en continu et ainsi minimisation des variations de température
- Durée d'impact faible des fondants
- Utilisation limitée de fondants agressifs
- Nettoyage minutieux des fours et creusets
- Réduction de l'agitation du four (rotation)

Dans certaines conditions, en fonction de la composition des garnissages et réfractaires usagés, la réutilisation est possible. Par exemple, les réfractaires sont réutilisés pour la fusion du cuivre primaire et secondaire après broyage comme matériau pouvant être coulé ou soutiré ou comme fondant pour ajuster la composition du laitier. En variante, le contenu métallique peut être séparé du matériau par fraisage et broyage et les garnissages et réfractaires usagés peuvent être réutilisés à des fins de construction. Le contenu métallique peut être recyclé vers le four de fusion ou fourni à d'autres usines de métaux non-ferreux.

2.10.3.2 Réduction des résidus produits par le système de dépollution

Comme décrit ci-dessus, les poussières des fumées et les boues, en fonction de la technologie de dépollution, constituent la principale source de résidu générée par la dépollution. Le volume de gaz de procédé qui doit être traité dépend fortement du type de four. Par exemple, un four totalement étanche émet moins de poussières qu'un four ouvert ou semi-fermé.

Comme déjà mentionné, les poussières chargées en métaux peuvent normalement être recyclées vers le four de fusion ou vendues pour d'autres utilisations avantageuses aux autres usines de métaux non-ferreux. La réutilisation directe des poussières comme matière première nécessite souvent une phase d'agglomération comme pré-procédé de traitement. Les poussières des fumées et les boues peuvent être traitées dans différents procédés hydrométallurgiques ou pyrométallurgiques.

Le séchage de l'alimentation du four de fusion peut provoquer une libération de SO_2 , notamment lorsque des minerais ou des concentrés sulfurés sont employés comme matière première (l'autre source est la teneur en soufre du combustible). Le gypse (CaSO_4) produit dans le laveur captant SO_2 peut parfois être recyclé vers le sécheur comme une partie de la charge en fondants d'un four en fonction du procédé employé.

La quantité de manches de filtre usagés peut être réduite grâce à des matériaux filtrants modernes qui sont plus robustes. Les filtres à manches sont caractérisés comme étant une technique de dépollution nécessitant très peu de maintenance. Si la manche est endommagée, le compartiment de filtre concerné peut être isolé avec des plaques de recouvrement jusqu'à ce que les réparations soient effectuées en toute sécurité. Un changement de filtre n'est généralement nécessaire que si 10 à 20% des compartiments de filtres ont été mis hors de service.

Le remplacement des filtres à manches avec des tissus modernes et fiables est souvent simple mais les exigences techniques et les coûts d'investissement des cas individuels doivent être pris en compte. Les manches de filtres usagées peuvent être recyclées dans le four de fusion. En cas de conversion ou de renouvellement du système filtrant, la durée de vie et la susceptibilité du filtre peuvent réduire le nombre de manches nécessaires. Si cela génère des coûts d'installation supplémentaires, ceux-ci peuvent être compensés par la baisse du nombre de défaillances des manches.

2.10.3.3 Réduction des résidus générés par le traitement des effluents

La présence d'eau de refroidissement thermiquement chargée dans l'environnement peut être réduite en utilisant différents types de systèmes de refroidissement comme les systèmes fermés, quasi fermés et les techniques de refroidissement en cycle ouvert (tours de refroidissement). Si un cycle de refroidissement fermé (par ex. aérorefroidisseurs) est employé, la libération de l'eau de refroidissement peut être minimisée, une certaine pression peut être nécessaire pour éviter l'accumulation de sel. Il faut noter que le choix du meilleur système de refroidissement est fonction des différents paramètres spécifiques au site. Afin de minimiser l'impact du refroidissement sur l'environnement en général, il convient de se référer au Document de référence des MTD sur les Systèmes de refroidissement.

La quantité d'eaux usées générée par un laveur humide peut être réduite si l'eau traitée est recyclée vers le laveur. Pour éviter l'augmentation des teneurs en sels dans le cycle d'eau de lavage, un léger purge d'eau doit être coulé en continu du système et remplacé par de l'eau fraîche.

2.10.3.4 Réduction des autres résidus provenant de la production des métaux non-ferreux

Toutes les machines qui fonctionnent dans une installation industrielle utilisent de l'huile pour la lubrification. Elle doit être changée en raison de l'arrachement du métal et des réactions chimiques dans l'huile. Une maintenance régulière, des réparations et une maintenance préventive peuvent minimiser la perte d'huile par des fuites et augmenter les intervalles entre les changements d'huile. La filtration, qui augmente la durée de vie, permet également de réduire la quantité d'huile usagée. Par exemple, des filtres de dérivation peuvent être installés pour traiter une petite partie de l'huile en continu. Ces mesures augmentent la durée de vie jusqu'à un facteur de 10 selon le système de filtre spécifique. Si les filtres à huile usagés sont collectés séparément, ils peuvent être concassés dans un broyeur. Le métal peut être réutilisé dans un four de fusion comme matière première secondaire, l'huile peut être centrifugée puis envoyée vers une raffinerie d'huile.

2.10.3.5 Recyclage et réutilisation de résidus provenant des procédés de fusion des métaux non-ferreux

Comme cela a déjà été montré dans cette section, les résidus provenant de la production des métaux non-ferreux peuvent être recyclés et réutilisés dans une large mesure. Le tableau suivant résume les différentes possibilités de recyclage et de réutilisation de ces résidus.

Source des résidus	Métaux associés	Produit intermédiaire ou résidu	Options de recyclage ou de réutilisation
Manutention des matières premières, etc.	Tous métaux	Poussières, balayures	<ul style="list-style-type: none"> Réintroduction dans le procédé principal
Fours de première fusion	Tous métaux	Laitier	<ul style="list-style-type: none"> Réintroduction dans la première fusion Matériaux de construction après traitement des scories. Industrie des abrasifs. Certaines parties des scories peuvent être utilisées comme matériaux réfractaires, par ex. les scories de la production de chrome métal.
	Ferroalliages	Laitiers riches	<ul style="list-style-type: none"> Matière première pour d'autres procédés d'élaboration de ferroalliages.
Fours de convertissage	Cu	Laitier	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage dans le four de première fusion
Fours d'affinage	Cu	Laitier	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage dans le four de première fusion
	Pb	Résidus d'écémage	<ul style="list-style-type: none"> Récupération d'autres métaux d'intérêt
	Métaux précieux	Résidus d'écémage et laitier	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage interne
Traitement des scories	Cu et Ni	Scories traitées	<ul style="list-style-type: none"> Matériaux de construction.
		Matte	<ul style="list-style-type: none"> Récupération des métaux
Fours de seconde fusion	Tous métaux Al secondaire	Résidus d'écémage	<ul style="list-style-type: none"> Retour au procédé après traitement.
		Laitier	<ul style="list-style-type: none"> Récupération des métaux
		Laitiers salins	<ul style="list-style-type: none"> récupération des métaux, des sels et des oxydes
Affinage électrolytique	Cu	Purge d'électrolyte	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de Ni.
		Restes d'anodes	<ul style="list-style-type: none"> Retour au convertisseur
		Boues anodiques	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de métaux précieux
Extraction électrolytique	Zn, Ni, Co, métaux précieux	Électrolyte usagé	<ul style="list-style-type: none"> Réutilisation en lixiviation
Électrolyse en bain de sels fondus	Al	Garnissage de cuve usé	<ul style="list-style-type: none"> Combustible ou mise en décharge
		Excédent du bain	<ul style="list-style-type: none"> Vente comme électrolyte
		Souches d'anodes	<ul style="list-style-type: none"> Récupération
	Na et Li	Matériau de la cuve	<ul style="list-style-type: none"> Ferraille après nettoyage
Distillation	Hg	Résidus	<ul style="list-style-type: none"> Réintégration en tête du procédé
	Zn, Cd	Résidus	<ul style="list-style-type: none"> Retour à l'ISF
Lixiviation	Zn	Résidus de ferrite	<ul style="list-style-type: none"> Mise en décharge, réutilisation de la solution
	Cu	Résidus	<ul style="list-style-type: none"> Mise en décharge
	Ni	Résidus Cu/Fe	<ul style="list-style-type: none"> Récupération, mise en décharge
Unité de fabrication d'acide sulfurique		Catalyseur	<ul style="list-style-type: none"> Régénération
		Boues acides	<ul style="list-style-type: none"> Mise en décharge
		Acide faible	<ul style="list-style-type: none"> Lixiviation, décomposition, neutralisation
Garnissages de four	Tous métaux	Réfractaires	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation comme agent favorisant la formation de scories, mise en décharge
Fraisage, rectification	Carbone	Poussières de carbone et de graphite	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation comme matière première dans d'autres procédés
Stripping	Cu, Ti	Acide usagé	<ul style="list-style-type: none"> Récupération
Systèmes de dépollution par voie sèche	La plupart – par filtres à manches ou électrofiltres	Poussières des filtres	<ul style="list-style-type: none"> Retour au procédé. Récupération d'autres métaux.
Systèmes de dépollution par voie humide	La plupart – par laveurs ou électrofiltres humides	Boues des filtres	<ul style="list-style-type: none"> Retour au procédé ou récupération d'autres métaux (par ex. Hg). Mise en décharge.
Boues de traitement des eaux usées	La plupart	Boues d'hydroxydes ou de sulfures.	<ul style="list-style-type: none"> Mise en décharge, réutilisation. Réutilisation.
Digestion	Alumine	Boues rouges	<ul style="list-style-type: none"> Mise en décharge, réutilisation de la solution

Tableau 2.27 : Résidus et utilisations potentielles

Selon un projet de recherche sur la manière d'éviter et de recycler les déchets d'un certain nombre d'usines de fusion des métaux non-ferreux en Rhénanie du Nord-Westphalie, le découpage suivant peut être présenté pour démontrer l'importance des différentes voies de recyclage [tm 83, MURL Düsseldorf 1999] [tm 168, W. Neuhaus 1999].

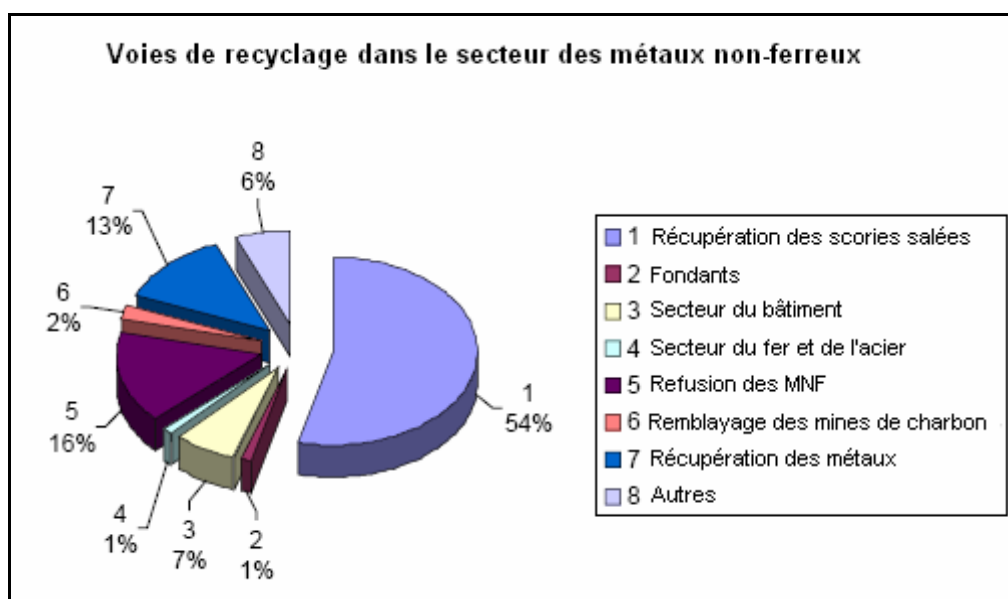


Figure 2.42 : Différentes voies de recyclage selon la quantité de résidus générés par un certain nombre d'usines de fusion des métaux non-ferreux en Rhénanie du Nord-Westphalie

Pour obtenir une réduction et un recyclage efficaces des déchets, on peut envisager ce qui suit :

- Des audits de réduction des déchets peuvent être réalisés périodiquement selon un calendrier.
- La participation active du personnel peut être encouragée dans ces initiatives.
- Une surveillance active des débits de matériaux, et des bilans de masse appropriés devraient être disponibles. Il faut que la surveillance comprenne aussi l'eau, l'électricité et la chaleur.
- Il faut bien comprendre la signification des coûts liés à la production de déchets au sein du procédé. Cela peut être obtenu par de bonnes pratiques de comptabilité permettant de garantir que les coûts de mise en décharge des déchets et les autres coûts environnementaux importants sont attribués aux procédés impliqués et ne sont pas traités simplement comme des charges indirectes du site.

2.11 Récupération de l'énergie

L'Article 3(d) de la Directive IPPC stipule que l'énergie doit être utilisée de manière efficace et cette note inclut des commentaires sur l'utilisation de l'énergie et sa place dans l'évaluation des MTD proposée au sein de chaque chapitre relatif à la production des métaux. Le Centre d'analyse et de diffusion des technologies énergétiques démontrées (CADDET) a consacré différents rapports à la consommation énergétique de l'industrie des métaux non-ferreux. Ces rapports ont été largement utilisés pour comparer les techniques.

2.11.1 Techniques appliquées

La récupération de l'énergie et de la chaleur est une pratique courante lors de la production et du moulage des métaux non-ferreux. Les procédés pyrométallurgiques présentent une forte intensité calorifique, et les gaz qu'ils émettent contiennent une énergie thermique considérable. Cette chaleur est donc récupérée à l'aide de brûleurs régénératifs, d'échangeurs thermiques et de chaudières. On peut ainsi produire de la vapeur ou de l'électricité qui sera utilisée sur site ou hors site, et les gaz de procédé ou de combustion peuvent être préchauffés [tm 118, ETSU 1996]. Les techniques de récupération de la chaleur utilisées varient d'un site à l'autre, en fonction d'un certain nombre de facteurs tels que les possibilités d'utilisation de la chaleur et de l'énergie au niveau ou à proximité du site, l'échelle des procédés et la probabilité que les gaz ou leurs constituants encrassent ou recouvrent les échangeurs thermiques.

Les exemples proposés ci-dessous sont représentatifs et constituent les techniques à envisager dans le cadre des procédés de production des métaux non-ferreux [tm 118, ETSU 1996]. Ces techniques sont compatibles avec de nombreux procédés existants :

- Dans la plupart des cas, les gaz chauds produits au cours de la fusion ou du grillage des minerais souffrés passent dans des chaudières de production de vapeur. La vapeur ainsi générée peut servir à produire de l'électricité et/ou être utilisée pour le chauffage. A titre d'exemple, citons un four de fusion du cuivre qui couvre 25 % de ses besoins énergétiques (10,5 MVA) en utilisant la vapeur générée par la chaudière de récupération d'un four flash. Outre la production d'électricité, la vapeur est utilisée comme vapeur à usage industriel dans le four de séchage des concentrés, et la chaleur résiduelle sert à préchauffer l'air comburant.
- D'autres procédés pyrométallurgiques sont également fortement exothermes, notamment lorsque l'air comburant est enrichi en oxygène. De nombreux procédés utilisent l'excès de chaleur généré lors des étapes de fusion ou de conversion pour fondre les matières secondaires, sans utiliser de combustible supplémentaire. Ainsi la chaleur dégagée par le convertisseur Pierce-Smith est utilisée pour fondre les déchets d'anodes. Dans ce cas, les déchets métalliques assurent le refroidissement du procédé et les ajouts sont régulés avec précision. Cela évite d'avoir à refroidir le convertisseur par d'autres moyens à différents moments du cycle. De nombreux autres convertisseurs sont en mesure d'utiliser les ajouts de déchets pour assurer leur refroidissement ; ceux qui ne le sont pas sont sujets à des développements de procédés pour le permettre.
- L'utilisation d'air enrichi en oxygène ou d'oxygène dans les brûleurs permet de réduire la consommation énergétique en induisant la fusion autogène ou la combustion totale des matières carbonées. Les volumes d'effluents gazeux sont fortement réduits, ce qui permet de diminuer la taille des ventilateurs, etc.
- Le matériau de garnissage des fours a également une influence sur le bilan thermique des opérations de fusion. Il semble que les garnissages réfractaires à faible masse thermique soient particulièrement avantageux, car ils permettraient de réduire la conductivité thermique et le stockage de la chaleur dans une installation [tm 106, Farrell 1998]. Ce facteur doit être pris en compte parallèlement à la longévité du garnissage et au risque d'infiltration de métal dans le garnissage. Cette technique n'est peut-être donc pas applicable dans tous les cas.

- Le séchage séparé des concentrés à basse température limite la consommation énergétique. Cela s'explique par l'énergie nécessaire pour surchauffer la vapeur dans un four de fusion et l'augmentation considérable du volume global de gaz émis, donc la taille des ventilateurs à utiliser.
- La production d'acide sulfurique à partir du dioxyde de soufre émis lors du grillage et de la fusion est un procédé exothermique qui comprend un certain nombre d'étapes de refroidissement des gaz. La chaleur générée dans ces gaz au cours de la conversion et celle contenue dans l'acide obtenu peut être utilisée pour générer de la vapeur et/ou de l'eau chaude.
- La chaleur est récupérée en utilisant les gaz chauds provenant des étapes de fusion pour préchauffer la charge du four. De même, le gaz de chauffe et l'air comburant peuvent subir un préchauffage ; il est également possible d'associer au four une chaudière de récupération. Ces techniques permettent d'améliorer le rendement thermique. Ainsi, la quasi-totalité des fours à cuves utilisés pour la fusion des déchets métalliques ou de cathodes de cuivre sont chauffés au gaz naturel. La conception de ces équipements offre un rendement thermique (utilisation du combustible) compris entre 58 % et 60 %, en fonction du diamètre et de la hauteur du four. La consommation de gaz est d'environ 330 kWh/t de métal produite. Les fours à cuve présentent un rendement élevé, notamment parce que la charge est préchauffée dans le four. Les effluents gazeux peuvent contenir suffisamment de chaleur résiduelle pour que celle-ci soit récupérée et réutilisée pour chauffer l'air comburant et le gaz de chauffe. Le dispositif de récupération de la chaleur nécessite de dévier les gaz de cheminée via un échangeur thermique dimensionné de façon adéquate, et de mettre en place un ventilateur de transfert et des conduites. La chaleur récupérée représente près de 4 % à 6 % de la consommation énergétique du four.
- L'étape de refroidissement effectuée avant le passage dans un filtre à manches constitue une technique importante, car elle assure la protection thermique du filtre et élargit la gamme de tissus utilisables. Il est parfois possible de récupérer de la chaleur à ce stade du processus. Ainsi, dans une configuration classique de four à cuve utilisé pour la fusion du métal, les gaz provenant de la partie supérieure du four sont conduits vers le premier d'une série de deux échangeurs thermiques, qui préchauffe l'air comburant du four. La température des gaz à la sortie de cet échangeur thermique se situe entre 200 et 450 °C. Le deuxième échangeur abaisse la température des gaz à 130 °C, avant que ceux-ci ne soient dirigés vers le filtre à manches. Les échangeurs thermiques sont généralement suivis d'un passage dans un cyclone, qui élimine les particules les plus grosses et fait fonction de pare-étincelles.
- Le monoxyde de carbone produit dans un four électrique ou un haut fourneau est collecté et utilisé comme combustible pour différents procédés, ou encore pour produire de la vapeur ou une autre forme d'énergie. Certains de ces fours produisent d'importantes quantités de gaz ; parfois, la majeure partie de l'énergie utilisée par une installation est assurée par le monoxyde de carbone collecté dans un four à arc électrique. Dans d'autres cas, la combustion du monoxyde de carbone dans le four fournit une partie de la chaleur nécessaire à la fusion.
- La technique consistant à réinjecter les effluents gazeux contaminés dans un brûleur oxycombustible permet de réaliser des économies d'énergie considérables. Le brûleur récupère la chaleur résiduelle contenue dans les gaz, utilise le contenu énergétique des polluants et les élimine [tm 116, Alfred 1998]. Ce type de procédé facilite également l'élimination des oxydes d'azote.
- L'utilisation du contenu calorifique des gaz ou de la vapeur générée(s) par les procédés pour élever la température des solutions de lixiviation est une pratique courante. Dans certains cas, une partie des flux de gaz peut être détournée vers un épurateur afin de transférer la chaleur dans l'eau, qui sera utilisée pour la lixiviation. Le gaz refroidi est ensuite renvoyé dans le flux principal avant de subir d'autres traitements de dépollution.
- Lors de la fusion de déchets électroniques ou de batteries usagées dans des cuves métallurgiques, le contenu calorifique de la fraction plastique des matériaux est utilisé pour fondre la fraction métallique ainsi que les autres déchets et constituants de base du laitier.

De nombreuses publications traitent des avantages que présente le préchauffage de l'air comburant utilisé dans les brûleurs. Si l'air est préchauffé à 400 °C, cela augmente la température de la flamme de 200 °C, tandis que si l'air est préchauffé à 500 °C, la température de la flamme augmente de 300 °C ; cela permet d'améliorer le rendement de fusion tout en réduisant la consommation énergétique.

Il existe une alternative au préchauffage de l'air comburant, à savoir le préchauffage du matériau chargé dans le four. Théoriquement, chaque préchauffage de 100 °C permet de réaliser 8 % d'économies d'énergie ; dans la pratique, certains affirment qu'un préchauffage de 400 °C permet de réaliser 25 % d'économies d'énergie, et qu'un préchauffage de 500 °C permet de réaliser 30 % d'économies d'énergie. Cette technique est appliquée à un large panel de procédés (préchauffage de la charge du four à l'aide des effluents gazeux chauds lors de la production de ferrochrome, par ex.).

Le schéma suivant représente la bilan énergétique du procédé Contimelt, qui utilise les gaz chauds ascendants d'un four à cuve pour préchauffer la charge.

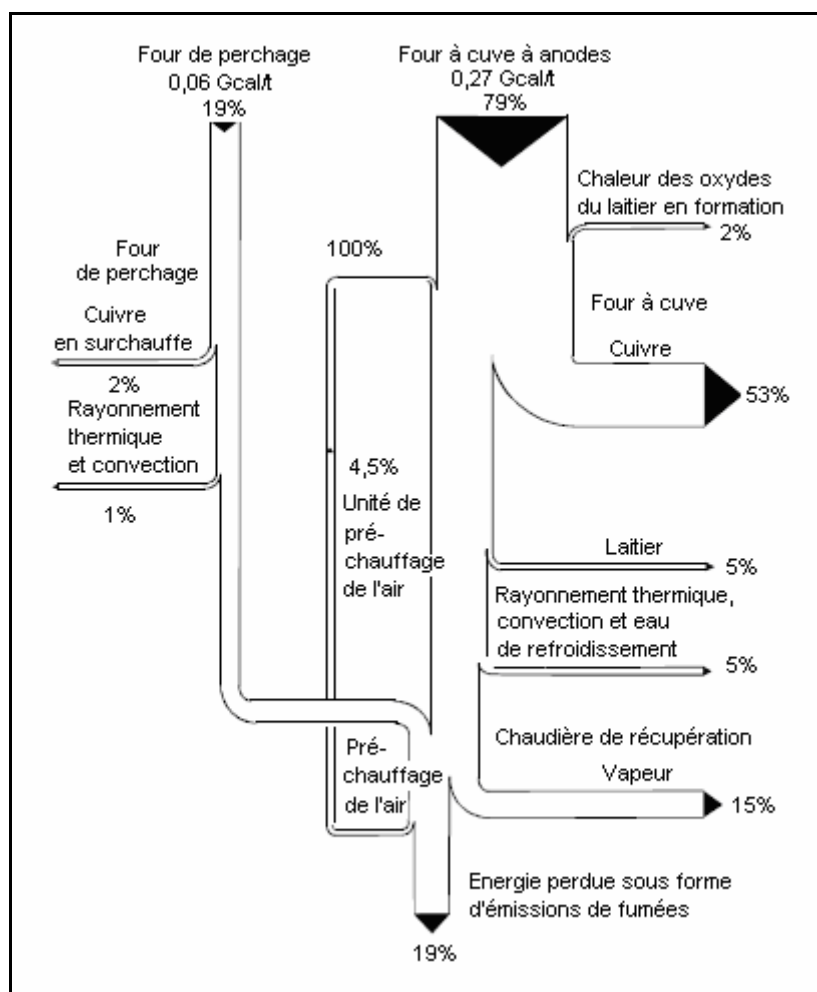


Figure 2.43 : Bilan thermique du procédé Contimelt

La récupération de la chaleur et de l'énergie est donc un enjeu essentiel pour le secteur, du fait du poids élevé de la dépense énergétique. La mise en œuvre des techniques de récupération d'énergie dans les installations existantes est souvent relativement simple [tm 118, ETSU 1996], mais on observe parfois des difficultés liées au dépôt des composés métalliques à l'intérieur des échangeurs thermiques. La conception adéquate des équipements nécessite donc une connaissance approfondie des composés émis et de leur comportement à différentes températures. L'utilisation de systèmes de nettoyage des échangeurs permet également de maintenir le rendement thermique.

Bien que les économies d'énergie évoquées ici soient associées à certains équipements spécifiques des installations, elles dépendent dans une large mesure des conditions propres à chaque site et à chaque procédé, et notamment des aspects économiques qui leur sont associés.

2.12 Effets croisés

Les effets croisés désignent le phénomène selon lequel la dépollution des émissions dans un milieu environnemental donné génère des émissions dans un autre milieu. La Directive IPPC encourage la prévention des émissions par des mesures en matière de conception, de bonne exploitation et de maintenance. Ce type de démarche permet de minimiser l'impact observé sur l'ensemble des milieux environnementaux. Rares sont les procédés qui ne génèrent aucune émission ; le présent document suggère néanmoins d'envisager certaines « technologies propres » lors de la détermination des MTD. Les principes de minimisation et de réutilisation des résidus et des eaux usées ainsi que les techniques de récupération de l'énergie présentés ci-dessus constituent les principaux exemples de cette initiative.

De même, l'utilisation d'oxygène, la limitation des transferts de matériaux en fusion en poches, la collecte et la réutilisation ou la conversion des gaz contribuent largement à minimiser les effets croisés. Les exemples courants sont la collecte du chlore émis lors de l'électrolyse puis sa réutilisation durant la lixiviation, ou encore la récupération du dioxyde de soufre.

Le choix du procédé de dépollution est également crucial, comme l'illustre la comparaison entre un laveur voie humide et un filtre à manches. Le laveur humide génère un effluent constitué par le trop-plein de solution, mais aussi une boue humide. Ce type de boues peut être plus difficile à réutiliser et peut poser certains problèmes au niveau du site d'élimination, mais ne forme toutefois aucune poussière lors du stockage. De ce fait, un laveur humide présente moins d'intérêt qu'un filtre à manches ; il présente également un inconvénient supplémentaire, à savoir une élimination moins efficace des particules dans la plupart des installations. Le laveur humide trouve néanmoins une application lorsque les poussières à éliminer sont très abrasives et très denses, ou fortement hygroscopiques. Dans ce type de cas, les filtres à manches peuvent s'avérer très difficiles à utiliser du fait de leur usure rapide ou du colmatage des manches, qui risqueraient d'entraîner des émissions importantes lors des arrêts. L'épuration par voie humide à pH régulé est très efficace pour absorber le dioxyde de soufre contenu dans les gaz présentant de faibles concentrations de SO₂. Pour chaque site, ces facteurs doivent être pris en compte et évalués de façon comparative.

Les coûts environnementaux induits par la production de l'énergie nécessaire à la mise en œuvre des procédés et des techniques de dépollution constituent un autre effet croisé majeur. Les exemples proposés dans ce document tiennent compte de ce facteur. Les comparaisons directes sont toutefois difficiles à établir, et certains aspects tels que la source d'énergie propre à un site donné peuvent accroître la complexité d'une telle évaluation.

L'évaluation des effets croisés est un paramètre essentiel, et est identifié dans les chapitres consacrés aux différents métaux lorsque les aspects spécifiques aux sites et aux techniques sont abordés.

2.13 Nuisances sonores et vibrations

Les nuisances sonores et les vibrations sont des problèmes courants dans le secteur, et proviennent de tous les stades de production. Les nuisances sonores émises par une installation se propagent dans l'environnement proche, ce qui a suscité de nombreuses plaintes par le passé. Des informations concernant les sources de bruit ainsi que les approches de prévention et de limitation des nuisances sonores et des vibrations ont été communiquées. L'effet de ces nuisances sur les techniciens travaillant au sein des installations dépasse la portée du présent document.

Les principales sources sont le transport et la manutention des matières premières et des produits ; les procédés de fabrication (pyrométallurgie, broyage et meulage, notamment) ; l'utilisation de pompes et de ventilateurs ; l'évacuation de la vapeur et la présence de systèmes d'alerte autonomes. Il existe différentes façons de mesurer les nuisances sonores et les vibrations ; toutefois le plus souvent, le

détail de ces méthodes est spécifique à chaque site et dépend de la fréquence des bruits ainsi que de l'emplacement des foyers de population.

Les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à ce que les niveaux de nuisances sonores et de vibrations soient faibles. Une maintenance rigoureuse permet d'éviter que certains équipements tels que les ventilateurs et les pompes ne se déséquilibrent. Il est possible de concevoir des raccordements entre les différents équipements afin d'empêcher ou de minimiser la transmission des bruits. Voici les techniques de réduction des nuisances sonores les plus couramment utilisées :

- mise en place de murs antibruit ;
- confinement des unités ou des équipements bruyants dans des structures conçues pour absorber l'énergie acoustique ;
- recours à des fixations anti-vibrations et à des raccordements entre les différents équipements ;
- orientation des machines qui constituent une source de nuisances sonores ;
- modification de la fréquence des ondes acoustiques.

2.14 Odeurs

L'industrie des métaux non-ferreux comporte plusieurs sources potentielles d'odeurs. Les principales sont les fumées métalliques, les huiles et les solvants organiques, les sulfures provenant du refroidissement du laitier et du traitement des eaux usées, les réactifs chimiques utilisés dans les procédés hydrométallurgiques et le traitement des effluents (ammoniac, par ex.), et les gaz acides. Le soin apporté à la conception, le choix des réactifs et la manutention soignée des matériaux peuvent empêcher les émissions d'odeurs. Il est ainsi possible d'éviter toute formation d'ammoniac à partir des résidus d'écrouissage d'aluminium, en veillant à ce que ces matériaux restent secs.

Les techniques de dépollution décrites plus haut dans ce chapitre contribuent toutes à la prévention et à l'élimination des odeurs. De façon plus générale, la qualité de l'organisation et de la maintenance jouent également un rôle considérable dans la prévention et l'élimination des odeurs.

Les principales règles permettant d'éliminer les odeurs sont les suivantes (par ordre décroissant) :

- éviter ou limiter l'utilisation de matières malodorantes ;
- confiner et extraire les matériaux et les gaz odorants avant qu'ils ne soient dispersés et dilués ;
- éventuellement, les traiter par post-combustion ou filtration.

En présence d'espèces biologiques spécifiques, certains milieux biologiques (tourbe ou matériaux similaires) jouent le rôle de substrats ; cette technique s'est avérée efficace dans l'élimination des odeurs [tm 159, VDI 1996]. Si des matériaux émettant une odeur forte sont dissous, cette tâche peut devenir très complexe et très coûteuse. Le traitement de très larges volumes de gaz à faibles concentrations de matériaux odorants nécessite une unité de traitement importante.

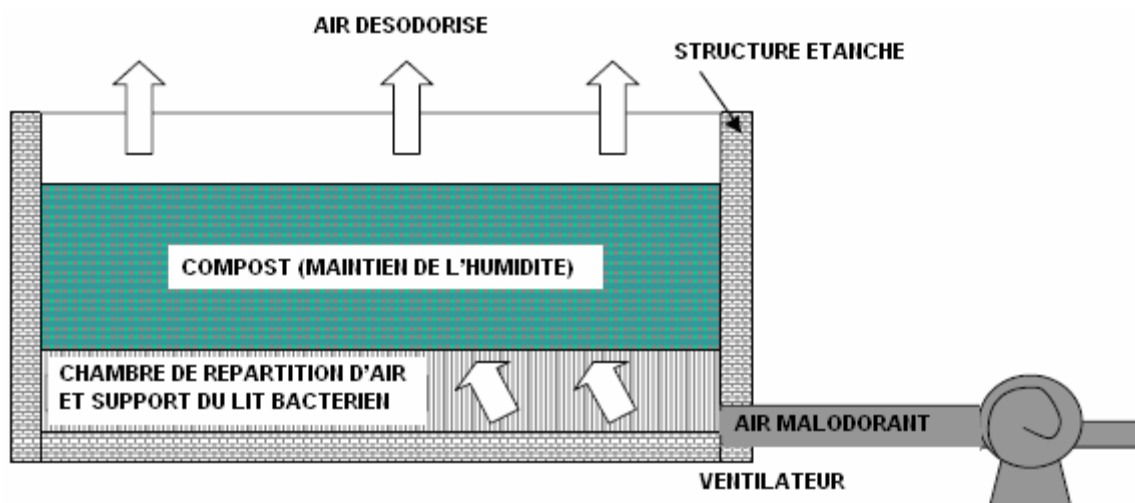


Figure 2.44 : Structure d'un bio-filtre simple

2.15 Aspects liés à la sécurité

Les recommandations générales relatives à la prévention et à l'anticipation des accidents du travail, ainsi qu'aux mesures à prendre, reposent sur les principes suivants :

2.15.1 Principe de prévention

- construction et exploitation de l'usine permettant d'empêcher toute dégradation non contrôlée du fonctionnement normal ;
- construction et exploitation de l'usine permettant de limiter les conséquences des accidents ;
- construction et exploitation de l'usine conformes aux meilleures techniques disponibles en matière de sécurité (mise en œuvre de techniques de sécurité correspondant à l'état de l'art).

2.15.2 Prise en compte des systèmes complexes propres aux procédés

L'étude des systèmes complexes ne peut être suffisamment approfondie qu'à l'aide de méthodes logiques et systématiques. Pour cela, il faut donc appliquer :

- des méthodes de recherche analytiques et systématiques telles que les études de Risques et d'Exploitableté (HAZOP – Hazard and Operability Studies) ;
- une analyse de sécurité détaillée tenant compte des conditions spécifiques à chaque cas.

2.15.3 Adéquation des moyens

Les exigences de sécurité sont classées en fonction « du type et de l'étendue des risques à prévoir ». A cet effet, les Etats membres ont adopté des règles généralement applicables :

- aux substances à risques (caractéristiques et liste des produits) ;
- aux activités industrielles à risques (liste des usines concernées).

Le lien objectif entre la quantité de produits dangereux présents et les risques de catastrophes est pris en compte suivant un principe de seuils quantitatifs, qui définit différents degrés d'exigences de sécurité en fonction de la quantité de produits dangereux présents dans chaque installation.

2.16 Exploitation et démantèlement des usines

L'Article 3(f) de la Directive IPPC prévoit que les mesures nécessaires doivent être prises lors de tout arrêt définitif des activités, afin d'éviter tout risque de pollution et de restaurer le site exploité dans un état satisfaisant. La protection des sols et des eaux revêt une importance capitale ; il faut donc empêcher toute remise en suspension de terre et de poussières dans l'air. Une approche intégrée repose, au minimum, sur les mesures suivantes :

- limiter le volume de terre à excaver ou à remblayer du fait de la construction ; s'assurer que le matériau constitutif du sol qui a été excavé subit un traitement adapté (de façon à éviter toute altération nuisible des propriétés du sol) ;
- limiter la quantité de substances qui se mélangent au sol (fuites, dépôts atmosphériques, stockage inadapté des matières premières, des produits ou des résidus lors de la phase d'exploitation de l'unité de production) ;
- évaluer toute contamination ancienne afin de tenir compte des conditions antérieures aux réglementations, et de s'assurer que la fermeture de l'unité de production s'effectue proprement (nettoyage et réhabilitation en vue de l'utilisation future du site, par ex.). Les fonctions naturelles du sol doivent, si possible, être préservées.

2.17 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementales en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les

observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales de cette section sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondée sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations neuves peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les contraintes locales.

Du fait de l'influence spécifique de chaque groupe de métaux, il est impossible de déterminer quelles sont les meilleures techniques disponibles pour l'ensemble des procédés de transformation communs. Par exemple, la sélection des procédés de production ne peut s'effectuer qu'en fonction du type de métal après avoir pris en compte les différentes influences que peuvent avoir les matières premières disponibles, etc. Les MTD proposées dans cette section pour les procédés communs concernent les aspects suivants :

- manutention et stockage des matériaux ;
- régulation des procédés ;
- collecte des fumées et des gaz ;
- élimination du soufre ;
- prévention et destruction des dioxines ;
- élimination du mercure présent dans les gaz de procédé.

2.17.1 Manutention et stockage des matériaux

Les techniques employées dépendent, dans une large mesure, du type de matériaux utilisé. Par exemple, le panel de techniques applicables aux éléments volumineux et lourds est totalement différent de celui utilisé pour les matériaux pulvérulents et fins. Ces questions sont spécifiques aux matériaux et sites individuels. Plusieurs techniques sont toutefois considérées comme MTD pour la prévention des émissions provenant du stockage des matériaux et des procédés de manutention.

Ces techniques sont énumérées plus haut dans ce chapitre sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD ». On considère toutefois que certaines de ces techniques sont plus efficaces pour la prévention des émissions liées à la manutention des matières premières :

- Utilisation de systèmes de stockage des liquides confinés dans des enceintes étanches capables de contenir, au minimum, le volume du plus gros réservoir à l'intérieur du mur de protection. Les Etats membres ont adopté différentes lignes directrices en la matière, auxquelles il faudra donc se conformer. Les zones de stockage doivent être conçues de façon à ce que les fuites éventuelles provenant des parties hautes des réservoirs et des systèmes de distribution soient interceptées et confinées à l'intérieur de l'enceinte. Le nom des substances contenues dans les réservoirs doit être lisible, et il est nécessaire de mettre en place des dispositifs d'alerte. Il est préférable d'opter pour des distributions programmées et des dispositifs de régulation automatiques afin d'éviter tout débordement des réservoirs de stockage.

- L'acide sulfurique et les autres réactifs doivent également être stockés dans des cuves à double paroi ou des réservoirs placés dans des enceintes résistantes aux produits chimiques de capacité équivalente. Il faut envisager d'utiliser des systèmes de détection des fuites et des dispositifs d'alerte. En présence d'un risque de contamination des nappes phréatiques, la zone de stockage doit être étanche et résistante aux matériaux qu'elle contient.
- Les points de distribution doivent être confinés à l'intérieur de l'enceinte afin de pouvoir collecter tout déversement de substances. Il faut procéder à la ventilation secondaire des gaz déplacés en direction du véhicule de distribution afin de réduire les émissions de COV. Pour éviter tout déversement, il faut envisager la remise en étanchéité automatique des conduites de distribution de matériaux.
- Les matériaux incompatibles (matériaux oxydants et matières organiques, par ex.) doivent être isolés les uns des autres, et, au besoin, des gaz inertes pour les cuves ou les zones de stockage doivent être utilisés.
- Si nécessaire, il peut être utile d'avoir recours à des drains d'interception des huiles et des matières solides pour assurer le drainage des zones de stockage ouvertes. Le stockage des matériaux susceptibles de répandre des huiles s'effectue sur des zones bétonnées équipées d'enceintes ou d'autres dispositifs de confinement. Il faut appliquer aux espèces chimiques stockées des méthodes de traitement des effluents.
- Les convoyeurs et les conduites utilisées pour le transfert des matériaux sont placés dans des zones ouvertes, sécurisées et bâties en surface, de façon à permettre la détection rapide des fuites et la prévention des dommages causés par les véhicules et autres équipements. Le tracé des conduites enfouies doit être consigné et marqué en surface ; il faut en outre disposer de systèmes d'excavation sécurisés.
- Les gaz (y compris les GPL) doivent être stockés dans des cuves pressurisées soigneusement conçues et solides ; la pression à l'intérieur des cuves et des conduites de distribution doit faire l'objet d'un suivi constant afin de limiter tout risque de rupture ou de fuite. Des équipements de surveillance des gaz doivent être disposés dans les zones confinées et à proximité des réservoirs de stockage.
- En présence de matériaux pulvérulents, il est possible d'opter si nécessaire pour des systèmes de distribution, de stockage et de récupération hermétiques. Les silos peuvent être utilisés pour une durée d'une journée. Les matériaux pulvérulents peuvent être stockés dans des bâtiments totalement fermés ; il n'est pas forcément indispensable d'utiliser de dispositifs de filtration spéciaux.
- Des agents chimiques appropriés et compatibles permettant d'assurer une fermeture hermétique (mélasses et PVA, par ex.) peuvent être employés pour réduire la tendance de certains matériaux à former des poussières.
- Si nécessaire, il est possible d'utiliser des convoyeurs fermés dotés de systèmes d'extraction et de filtration solides et bien conçus au niveau des points de distribution, des silos, des dispositifs de transfert pneumatiques et des points de transfert à convoyeurs, afin d'empêcher les émissions de poussières.
- Les matériaux non-pulvérulents et insolubles peuvent être stockés sur des surfaces étanches associées à un drainage et à une collecte des effluents.
- Les copeaux, les tournures et autres matériaux huileux doivent être stockés sous abri pour éviter qu'ils ne soient emportés par les eaux de pluie.
- Des systèmes de transport rationalisés peuvent permettre de minimiser la formation et le transport des poussières sur un site. Les eaux de pluie qui emportent les poussières doivent être collectées puis traitées avant d'être rejetées.

- Les roues et les caisses des véhicules utilisés pour la distribution ou la manutention des matériaux pulvérulents doivent être lavées. La méthode de lavage utilisée dépend des conditions propres à chaque site (formation de gel, par ex.). Il peut être utile d'organiser des campagnes de balayage des routes.
- Il est possible d'adopter des systèmes de contrôle et d'inspection des stocks afin d'éviter les déversements de matériaux et d'identifier les fuites.
- Des systèmes d'échantillonnage et de dosage peuvent être intégrés aux dispositifs de manutention et de stockage des matériaux, afin de déterminer la qualité des matières premières et de choisir le procédé le mieux adapté. La conception et l'utilisation de ces systèmes doivent satisfaire aux mêmes exigences strictes que les dispositifs de manutention et de stockage.
- Les zones utilisées pour le stockage des réducteurs (charbon, coke ou copeaux de bois, par ex.) doivent faire l'objet d'une surveillance permettant de détecter les incendies dus à l'auto-combustion.
- Il faut veiller à mettre en œuvre de bonnes pratiques en matière de conception, de construction et de maintenance.
- Le tableau suivant résume les techniques selon le type et les caractéristiques des matériaux :

Matière première	Groupe de métaux concerné	Méthode de manutention	Méthode de stockage	Remarques
Concentrés : Risque de formation de poussières Sans formation de poussières	Tous	Convoyeurs fermés ou pneumatiques Convoyeurs couverts	Bâtiment fermé Zone de stockage couverte	Prévention de la contamination des eaux
Matériaux à granulométrie fine (poudres de métaux, par ex.)	Métaux réfractaires	Convoyeurs fermés ou pneumatiques Convoyeurs couverts	Fûts, bennes et trémies fermés	Prévention de la contamination des eaux et des émissions fugitives dans l'air
Matières premières secondaires : Éléments volumineux Éléments de petite taille Fines Copeaux	Tous	Chargeuse mécanique Bennes Manutention en enceinte fermée ou sous forme agglomérée	Ouvert Travées couvertes Enceinte fermée pour les matériaux pulvérulents Couvert	Prévention de la contamination des eaux Réactions avec l'eau Drainage d'huiles
Fondants : Risque de formation de poussières Sans formation de poussières	Tous	Convoyeurs fermés ou pneumatiques Convoyeurs couverts	Bâtiment fermé Zone de stockage couverte	Prévention de la contamination des eaux
Combustibles solides et coke	Tous	Convoyeurs couverts	Zone de stockage couverte	Uniquement en l'absence de risque de formation de poussières
Combustibles liquides et GPL	Tous	Conduites aériennes	Stockage homologué Enceintes murées	Ventilation en retour des conduites de distribution
Gaz de process : Oxygène Chlore, CO	Tous Al, métaux précieux, Ni	Conduites aériennes Conduites à pression réduite	Stockage homologué	Surveillance des pertes de charge, systèmes d'alerte pour les gaz toxiques
Solvants	Cu, Ni, Zn, métaux précieux, carbone	Conduites aériennes Manutention à la main	Fûts, réservoirs	Ventilation en retour des conduites de distribution
Produits : Cathodes, fil-machine, billettes, lingots, gâteaux, etc.	Tous	Dépend des conditions.	Zone bétonnée ouverte ou stockage couvert	Système de drainage approprié
Résidus de process à récupérer	Tous	Dépend des conditions.	Stockage ouvert, couvert ou fermé en fonction du risque de formation de poussières et de réaction avec l'eau	Système de drainage approprié
Déchets à éliminer	Tous	Dépend des conditions.	Travées ouvertes,	Système de drainage

(garnissages des fours, par ex.)			couvertes, fermées ou hermétiques (fûts) selon la nature des matériaux	approprié
----------------------------------	--	--	--	-----------

Tableau 2.28 : Aperçu des techniques de manutention et de stockage

2.17.2 Régulation des procédés

Les principes sur lesquels se fondent les Meilleures Techniques Disponibles incluent les concepts sur la conception, l'exploitation, la régulation, la gestion humaine et la maintenance. Le soin apporté à ces différents aspects permet de réaliser de bonnes performances en termes de prévention et de minimisation des émissions, d'efficacité du procédé et d'économies de coûts. La régulation efficace des procédés favorise la réalisation de ces performances, mais permet aussi d'assurer un degré satisfaisant de sécurité.

Le secteur bénéficie depuis peu d'outils d'exploitation et de régulation applicables à un large panel de procédés. Les techniques utilisées dans ce domaine sont les suivantes : échantillonnage et analyse des matières premières afin de réguler les conditions de fonctionnement de l'unité de production ; bon mélange des différentes matières chargées permettant d'optimiser le rendement de conversion et de réduire les émissions et les rejets ; utilisation de systèmes de pesage et de dosage des charges ; utilisation de microprocesseurs permettant de réguler la vitesse d'alimentation des matériaux, les procédés critiques, les conditions de combustion et les ajouts de gaz.

Plusieurs paramètres peuvent être mesurés afin de faciliter la régulation des procédés ; les paramètres critiques sont surveillés à l'aide de dispositifs d'alerte :

- surveillance en ligne de la température, de la pression (ou dépression) des fours et du volume/débit de gaz utilisés ;
- surveillance des différents constituants des effluents gazeux (O_2 , SO_2 , CO) ;
- surveillance en ligne des vibrations afin de détecter les blocages et les ruptures éventuelles des équipements ;
- surveillance en ligne du courant et de la tension des procédés électrolytiques ;
- surveillance en ligne des émissions afin de réguler les paramètres critiques des procédés.

La température des fours de fusion doit faire l'objet d'un suivi et d'une régulation afin d'éviter toute surchauffe susceptible de produire des fumées contenant des métaux et des oxydes métalliques.

Les techniciens, ingénieurs et autres catégories de personnel doivent être formés et évalués en permanence dans l'utilisation des instructions de fonctionnement et des techniques de régulation modernes décrites, et dans l'importance des alertes et des mesures à prendre.

Les niveaux de supervision doivent être améliorés pour tirer parti des dispositifs énoncés ci-dessus et renforcer la responsabilité des techniciens.

2.17.3 Collecte des fumées et des gaz

Les émissions dans l'air sont générées par le stockage, la manutention et le prétraitement des matériaux, ainsi que des étapes pyrométallurgiques et hydrométallurgiques. Les transferts de matériaux constituent une source majeure d'émissions. Les données disponibles mettent en évidence l'importance des émissions fugitives dans de nombreux procédés, et indiquent que ces émissions peuvent être largement plus importantes que celles captées et traitées. Il est alors possible de réduire l'impact environnemental en suivant la hiérarchie des techniques de collecte des gaz applicables à tous les stades du processus (stockage et manutention des matériaux, réacteurs et fours, points de transfert des matériaux). Le risque d'émissions fugitives doit être pris en compte à toutes les étapes de la conception et du développement des procédés. Voici, dans l'ordre, la liste des techniques de collecte des gaz associées à chaque étape de traitement (par ordre de priorité décroissante) :

- optimisation du procédé et minimisation des émissions, notamment par prétraitement thermique ou mécanique des matériaux secondaires pour limiter la contamination organique des matières chargées ;
- utilisation de fours et autres unités de process hermétiques afin de prévenir les émissions fugitives, permettre la récupération de la chaleur et la collecte des gaz de process qui seront traités ou réutilisés (recyclage du monoxyde de carbone sous forme de combustible, et du SO₂ sous forme d'acide sulfurique, par ex.) ;
- utilisation de fours semi-hermétiques dans les cas où les fours hermétiques ne seraient pas disponibles ;
- limitation des transferts de matériaux entre chaque procédé ;
- lorsque ce type de transfert est inévitable, utilisation de goulottes de coulée plutôt que de poches pour contenir les matériaux en fusion ;
- dans certains cas, le fait de limiter les techniques employées à celles permettant d'éviter tout transfert de matériaux en fusion empêche de récupérer certains matériaux secondaires qui, sans cela, risquent de rejoindre le flux de déchets. Il est alors préférable de mettre en place des dispositifs secondaires ou tertiaires de collecte des fumées ;
- conception du capotage et des conduites de façon à capter les fumées émises lors du transfert et de la vidange de métal chaud, de matte et de laitier ;
- il peut être nécessaire de placer les fours ou les réacteurs en enceinte fermée afin d'empêcher les émissions fugitives dans l'atmosphère ;
- lorsque l'extraction primaire des fumées et l'enceinte fermée risquent d'être inefficaces, le four peut être totalement fermé, et l'air de ventilation aspiré au moyen de ventilateurs d'extraction puis dirigé vers un système de traitement et d'élimination adapté ;
- l'implantation d'un système de collecte des fumées en toiture, qui consomme beaucoup d'énergie, ne doit être envisagée qu'en dernier recours.

2.17.4 Élimination du dioxyde de soufre

Les Meilleures Techniques Disponibles pour l'élimination du dioxyde de soufre dépendent du niveau de concentration du gaz produit et du degré de fixation du soufre dans une matte ou un laitier permettant d'empêcher la formation de dioxyde de soufre. En présence de gaz faiblement concentrés, on considère que l'utilisation d'un laveur par voie humide ou semi-sèche produisant du gypse (qui sera vendu, si possible) constitue la MTD.

En présence de gaz plus concentrés, on considère que la récupération du dioxyde de soufre par absorption dans de l'eau froide avant passage du gaz résiduel dans une unité de fabrication d'acide sulfurique, suivi de la séparation et de la production de dioxyde de soufre liquide à partir de la solution absorbée constitue la MTD, dès lors qu'il existe des un marché local pour l'acide. L'utilisation d'une unité d'acide sulfurique de contact à double absorption avec quatre étages au minimum est considérée comme la MTD. Le principe consistant à maximiser la concentration du gaz en entrée est également considéré comme MTD car il permet de conduire ensuite le procédé d'élimination avec un rendement maximal. Les facteurs suivants sont considérés comme MTD dans le cas d'une unité de fabrication d'acide sulfurique traitant les effluents gazeux provenant d'un four de fusion.

- Une unité de contact à double absorption avec un minimum de quatre étages peut être utilisée dans une installation nouvelle. Un catalyseur dopé au césium peut être utilisé pour accroître les taux de conversion. Il est parfois possible d'optimiser les catalyseurs existants au cours de la maintenance en intégrant des catalyseurs dopés à l'oxyde de césium lors des ajouts de catalyseurs. Ces changements sont particulièrement efficaces lorsqu'ils sont effectués au niveau des étages finaux

où il y a une faible teneur en dioxyde de soufre. Pour être totalement efficaces, ils doivent toutefois s'accompagner d'améliorations dans d'autres domaines.

- Les gaz sont dilués avant les étapes de mise en contact afin d'optimiser la teneur en oxygène et d'obtenir une teneur en SO_2 d'environ 14 % (ou légèrement supérieure) afin de respecter les limites thermiques du matériau de support du catalyseur. Pour ce type de concentrations élevées à l'entrée, il est nécessaire de procéder au dopage des catalyseurs à l'oxyde de césium, puisque cela permet d'abaisser la température des gaz entrants lors du premier étage.
- En présence de concentrations faibles et variables de SO_2 (1,5 – 4 %), une unité à absorption simple telle que le procédé WSA peut être mise en place dans les installations existantes. L'utilisation d'un catalyseur dopé à l'oxyde de césium au niveau du dernier étage permet d'atteindre des performances optimales ; ces changements peuvent être effectués lors des changements de catalyseur en routine ou au cours de la maintenance. Pour être totalement efficaces, ils doivent s'accompagner d'améliorations dans d'autres domaines comme le traitement des gaz pour empêcher l'empoisonnement du catalyseur. La transformation en unité à double contact est complexe et coûteuse, mais l'utilisation d'une unité à contact simple associée, au besoin, à une désulfuration des gaz de queue afin de produire du gypse destiné à la vente permet de réaliser des économies d'énergies et de réduire le volume de déchets produits.
- Les fluorures et les chlorures doivent être éliminés afin d'éviter que l'unité de traitement située en aval ne soit endommagée.
- Les poussières doivent être éliminées des fumées avant les étapes de catalyse, de façon à obtenir un gaz d'une qualité $< 1 \text{ mg de poussières/Nm}^3$ (gaz clair à l'œil nu). A ce stade, le mercure doit également être éliminé si sa teneur dans la charge le justifie. Dans les unités existantes dépourvues de système d'élimination du mercure, on peut avoir recours à un procédé d'échange d'ions ou à une précipitation (sous forme de thiosulfate de mercure, par ex.) afin d'éliminer le mercure présent dans l'acide, si nécessaire.
- La teneur des gaz entrants en trioxyde de soufre doit être réduite à moins de 15 – 25 mg/Nm^3 environ. L'acide faible ainsi obtenu peut être décomposé puis utilisé pour produire de l'acide.
- Lorsque les concentrations en gaz sont très faibles et que la chaleur de réaction ne suffit pas à maintenir la température du lit catalytique, il faut utiliser des systèmes de chauffage des gaz munis de dispositifs de régulation automatique.
- Les gaz sont refroidis jusqu'à une température compatible avec l'équilibre thermique de l'unité de production d'acide. La température dépend de la concentration de SO_2 des gaz et de la concentration de l'acide produit. En présence d'un gaz présentant une teneur en SO_2 de 4 à 6 %, il faut abaisser les températures en deçà de 30 °C, tandis qu'un gaz présentant une teneur en SO_2 largement supérieure à 10 % tolère des températures d'environ 35 à 40 °C, lorsque l'on produit de l'acide d'un indice de 98,5 %.
- Dans le cas où des brouillards acides sont émis, on considère que l'élimination des brouillards acides (le cas échéant) à l'aide de filtres à bougies avant l'évacuation à la cheminée constitue une MTD.

2.17.5 Prévention et destruction des dioxines

La présence ou la formation de dioxines est à prendre en considération pour de nombreux procédés pyrométallurgiques de production des métaux non-ferreux. Certains exemples particuliers sont reportés dans les chapitres spécifiques relatifs aux différents métaux ; dans ces cas, les facteurs suivants sont considérés comme MTD pour empêcher la formation de dioxines et les détruire, si nécessaire. Il est possible d'associer plusieurs de ces techniques. La littérature technique indique que certains métaux non-ferreux servent de catalyseurs à la synthèse de novo et il est parfois nécessaire que les gaz soient épurés avant de subir une étape de dépollution supplémentaire.

- Contrôle de la qualité des déchets métalliques entrants, en fonction du procédé utilisé. Utilisation d'une charge adaptée au four ou au procédé employé. La sélection et le tri visant à empêcher l'ajout de matériaux contaminés par des matières organiques ou des polluants précurseurs permettent de limiter le risque de formation de dioxines.
- Utilisation de chambres de post-combustion bien conçues et convenablement utilisées ; trempe rapide des gaz chauds jusqu'à une température située en deçà de 250 °C.
- Utilisation de conditions de combustion optimales. L'utilisation d'une injection d'oxygène dans la partie supérieure du four pour assurer une combustion complète des gaz issus du four, si nécessaire.
- Absorption sur charbon actif dans un réacteur à lit fixe ou mobile, ou par injection dans le flux de gaz ; élimination des dioxines sous forme de poussières sous filtre.
- Système d'élimination des poussières à très haute efficacité, par exemple : filtres céramiques, filtres à manches à haute efficacité ou la chaîne de traitement des gaz avant passage dans une unité de fabrication d'acide sulfurique.
- Utilisation d'une étape d'oxydation catalytique ou de filtres à manches intégrant une couche catalytique.
- Traitement des poussières collectées dans des fours à haute température afin de détruire les dioxines et de récupérer les métaux.

Les concentrations des émissions associées aux procédés décrits ci-dessus sont de $< 0,1 - 0,5 \text{ ng/Nm}^3$, en fonction de la nature des matières chargées, du procédé de fusion ou de fonte, et des techniques ou combinaisons de techniques utilisées pour éliminer les dioxines.

2.17.6 Élimination du mercure

Il est nécessaire d'éliminer le mercure lorsque l'on utilise des matières premières qui contiennent ce métal. Certains cas spécifiques sont reportés dans les chapitres relatifs aux différents métaux ; les techniques suivantes sont alors considérées comme MTD.

- procédé Boliden-Norzink avec récupération de la solution de lavage et production de mercure métal ;
- procédé Bolchem avec élimination du sulfure de mercure par filtration pour pouvoir renvoyer l'acide à l'étape d'absorption ;
- procédé Outokumpu ;
- procédé au thiocyanate de sodium ;
- filtre à charbon actif : un filtre d'adsorption à base de charbon actif sert à éliminer les vapeurs de mercure présentes dans le flux de gaz, ainsi que les dioxines.

Dans le cas des procédés pour lesquels il est impossible d'éliminer le mercure des gaz, on considère que les deux techniques de réduction de la teneur en mercure de l'acide sulfurique produit lors de la production des métaux non-ferreux constituent les MTD :

- procédé Superlig d'échange d'ions ;
- procédé à l'iodure de potassium.

Les émissions associées aux procédés ci-dessus sont liées à la présence éventuelle de mercure résiduel dans l'acide produit. Conformément aux spécifications, celui-ci doit présenter une concentration de mercure $< 0,1 \text{ ppm (mg/l)}$, ce qui équivaut à environ $0,02 \text{ mg/Nm}^3$ dans le gaz épuré.

2.17.7 Traitement des effluents et réutilisation de l'eau

Les meilleures techniques disponibles sont une combinaison des différentes méthodes de traitement ; elles ne peuvent être choisies qu'au cas par cas, en tenant compte des facteurs spécifiques à chaque site. Dans un cas donné, la meilleure solution pour minimiser le volume d'eaux usées et la concentration des polluants est de déterminer les facteurs centraux suivants :

- les procédés qui génèrent les eaux usées ;
- le volume d'eaux usées ;
- la nature et la concentration des polluants.

Les polluants les plus courants sont les métaux et leurs composés ; le traitement initial consiste principalement à précipiter les métaux sous forme d'hydroxydes ou de sulfures en une ou plusieurs étapes, puis à éliminer le précipité par sédimentation ou filtration. La technique utilisée varie en fonction de la combinaison de polluants présents. Le tableau suivant résume les méthodes décrites plus haut.

Source d'eaux usées	Métaux associés produits	Méthodes de minimisation	Méthodes de traitement
Eau de procédé	<ul style="list-style-type: none"> production d'alumine cassage des batteries plomb-acide stripping à l'acide 	<ul style="list-style-type: none"> réintroduction dans le procédé si possible 	<ul style="list-style-type: none"> neutralisation, précipitation et décantation électrolyse
Eau de refroidissement indirect	<ul style="list-style-type: none"> refroidissement du four pour la plupart des métaux refroidissement de l'électrolyte dans le cas du zinc 	<ul style="list-style-type: none"> utilisation d'un système de refroidissement hermétique surveillance du système pour détecter les fuites 	<ul style="list-style-type: none"> décantation
Eau de refroidissement direct	<ul style="list-style-type: none"> coulée du cuivre électrodes en carbone 	<ul style="list-style-type: none"> décantation ou autre traitement système de refroidissement fermé 	<ul style="list-style-type: none"> décantation précipitation au besoin
Granulation du laitier	<ul style="list-style-type: none"> cuivre, nickel, plomb, métaux précieux, ferro-alliages 	<ul style="list-style-type: none"> 	<ul style="list-style-type: none"> décantation précipitation au besoin
Électrolyse	<ul style="list-style-type: none"> cuivre, nickel, zinc 	<ul style="list-style-type: none"> système hermétique extraction électrolytique du trop-plein d'électrolyte 	<ul style="list-style-type: none"> neutralisation et précipitation
Hydrométallurgie (purge)	<ul style="list-style-type: none"> zinc, cadmium 	<ul style="list-style-type: none"> système hermétique traitement de purge 	<ul style="list-style-type: none"> décantation précipitation au besoin
Système de dépollution (purge)	<ul style="list-style-type: none"> épurateurs par voie humide électrofiltres humides et laveurs humides pour les unités d'acide 	<ul style="list-style-type: none"> traitement de purge ; réutilisation des écoulements d'acide faible si possible 	<ul style="list-style-type: none"> décantation précipitation au besoin
Eaux de surface	<ul style="list-style-type: none"> tous 	<ul style="list-style-type: none"> stockage adapté des matières premières 	<ul style="list-style-type: none"> décantation précipitation au besoin filtration

Tableau 2.29 : Aperçu des écoulements d'eaux usées

2.17.8 Autres procédés communs

Les meilleures techniques disponibles pour l'ensemble des autres procédés présentés dans ce chapitre sont celles qui reposent sur les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD, proposées dans les différentes sous-sections. Il faut donc se reporter aux paragraphes correspondants. Les chapitres relatifs aux différents métaux donnent davantage de détails lorsqu'ils présentent, le cas échéant, certains facteurs particuliers susceptibles d'affecter le choix de la technique à utiliser.

2.18 Techniques émergentes

Seules les techniques émergentes relatives aux procédés communs présentés dans la section intitulée meilleures techniques disponibles sont mentionnées ici. Les techniques émergentes applicables aux autres procédés sont reportées dans chacun des chapitres suivants.

Aucune autre technique n'a été mentionnée pour les sections intitulées Stockage et manutention des matériaux, Élimination du mercure et Prévention et destruction des dioxines.

2.18.1 Élimination du soufre

Certaines techniques sont actuellement en cours de développement [tm 209, JOM 1999] :

- Une unité d'acide sulfurique à contact simple associée à une unité d'acide à tour modifiée présenterait un rendement d'élimination du soufre deux fois supérieur à celui des procédés traditionnels. La concentration de SO₂ des gaz résiduels serait < 3 ppm.
- Un procédé de désulfuration biologique des fumées consistant à convertir en soufre élémentaire le SO₂ présent dans les émissions dans l'air ou dans l'eau présenterait un rendement d'élimination supérieur à 95 %.

3 PROCÉDES DE PRODUCTION DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES (Sn ET Be INCLUS) À PARTIR DE MATIÈRES PREMIÈRES PRIMAIRES ET SECONDAIRES

3.1 Procédés et techniques appliqués

3.1.1 Cuivre primaire

Le cuivre primaire peut être produit à partir de concentrés primaires ainsi que d'autres matériaux selon une méthode pyrométallurgique ou hydrométallurgique [tm 22, EC 1991 ; tm 27, HMIP Cu 1993 ; tm 26, PARCOM 1996]. Les concentrés contiennent diverses quantités de métaux autres que le cuivre et différentes étapes du procédé sont utilisées pour les isoler et les récupérer au maximum [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Les procédés génériques sont présentés ci-dessous.

3.1.1.1 Méthode pyrométallurgique

Cette méthode comporte un certain nombre d'étapes qui dépendent du concentré utilisé. La plupart des concentrés sont de type sulfurés et les étapes impliquées sont le grillage, la fusion, la conversion, l'affinage et l'affinage électrolytique.

Une description succincte de tous les fours mentionnés dans cette section est donnée dans le Chapitre 2. Une description plus détaillée en est fournie dans la section « Techniques » du présent chapitre [tm 92, Copper Expert Group 1998].

3.1.1.1.1 Fusion du concentré en matte

Le grillage partiel transforme les sulfures de fer et de cuivre complexes présents dans le concentré en sulfures simples par chauffage du minerai ou du concentré dans une atmosphère oxydante. Les gaz à base de soufre générés par ce procédé sont acheminés vers des unités de fabrication d'acide situées sur le site de production où ils sont utilisés comme matière première pour la production d'acide sulfurique ou de SO_2 liquide. La phase de fusion permet alors de séparer le sulfure de cuivre des autres solides présents dans les minerais par la formation de silicates, et notamment de silicates de fer. Cette réaction dépend du degré d'affinité du cuivre avec le soufre par rapport aux autres impuretés métalliques. Normalement, aucun grillage partiel n'est effectué.

Le grillage et la fusion sont généralement réalisés simultanément dans un four unique à des températures élevées afin de produire un bain liquide pouvant être scindé en deux éléments : la matte (constituée de sulfure de cuivre et d'une petite quantité de sulfure de fer), d'une part, et le laitier riche en fer et en silice, d'autre part. Un fondant contenant de la silice et, si nécessaire, de la chaux (CaO) est généralement ajouté au bain liquide afin de favoriser la formation du laitier.

Deux procédés de fusion de base sont utilisés : la fusion en bain fondu et la fusion éclair. Le procédé de fusion éclair fait appel à un enrichissement à l'oxygène pour générer une réaction auto-thermique (autogénique) ou quasi-auto-thermique. Le procédé de fusion en bain fondu fait généralement appel à un enrichissement en oxygène moins important. L'utilisation d'oxygène génère également des concentrations en dioxyde de soufre plus élevées qui améliorent grandement la collecte des gaz effectuée à l'aide de systèmes de récupération du soufre (généralement, la production d'acide sulfurique ou la production de dioxyde de soufre liquide).

La fusion en bain fondu est réalisée dans un certain nombre de fours brevetés : fours à réverbères, fours électriques ou fours de type ISA Smelt, Noranda, Mitsubishi, Teniente, Baiyin ou Vanyucov [tm 22, EC 1991 ; tm 26, PARCOM 1996 ; tm 137, Cu Expert Group 1998]. Tous les procédés reposent sur le fait que les procédés de grillage et de fusion ont lieu dans un bain fondu avec séparation du

laitier et de la matte ; la coulée est réalisée de différentes manières. Certains fours peuvent fonctionner sans préchauffage du concentré, mais la vapeur d'eau surchauffée augmente le volume des gaz.

Procédé de fusion	Etat de développement		Aspects économiques		Commentaires
	Utilisation à échelle industrielle	Performances environnementales : potentiel ou contraintes	Faisabilité économique	Niveau de production : potentiel et/ou restrictions	
Fusion dans un four réverbère	En place	Limitées dans une certaine mesure	Acceptable	Restriction au niveau de la capacité de fusion d'une unité	
Grillage partiel et fusion dans un four électrique	En place	Bonnes	Bonne	Restrictions en termes de capacité de production	Possible facteur limitant provenant de la taille du four ?
Four à fusion éclair Outokumpu et convertisseur Pierce-Smith	En place	Bonnes	Bonne	Capacité de production très élevée possible sur 1 site, dépend de la conception du four et du type de concentrés	Considéré comme concept « standard » pour la fusion primaire de cuivre au niveau mondial, avec encore un potentiel d'amélioration
Fusion éclair Inco	En place	Bonnes	Bonne	Restrictions démontrées en termes de capacité de production	Taille des fours installés. Encore du potentiel d'amélioration.
Application Contop	En fonctionnement sur 1 site	Probablement bonnes	Probablement acceptable	Restriction due à la taille du décanteur. Fours et brûleurs possibles à installer	Brûleur cyclone seulement. Caractéristique de procédé mise en place à l'échelle industrielle
Convertisseur Teniente, procédé Noranda	En place	Bonnes	bonne	Limitation de la capacité de production à cause de la taille du réacteur de l'enrichissement à l'oxygène	Par rapport à d'autres procédés, volume d'air entrant plus important donc plus d'énergie pour la traitement des fumées
ISA Smelt	En fonctionnement sur 3 sites	Bonnes	bonne	Capacité de production plus élevée non testée	Potentiel d'amélioration
Procédé Vanyukov	6 fours en fonctionnement industriel en Russie et au Kazakhstan	Potentiellement bonnes	probablement bonne.	Aucune donnée précise disponible	Information indisponible pour juger correctement. En générale, cette technologie peut présenter un potentiel considérable.
Procédé Bayrin	Nombre exact de site inconnu. Au moins 2 fours en fonctionnement industriel	Potentiellement bonnes	Inconnue	Aucune donnée précise disponible. L'information disponible suggère que des capacités de production de 75000 t/an sont possibles	Information indisponible pour juger correctement. En générale, cette technologie peut présenter un potentiel considérable
Fusion éclair du blister dans un four Outokumpu	En place	Bonnes	bonne		Applicable aux concentrés avec peu de fer / peu de laitier formé.
Procédé Mitsubishi pour fusion du cuivre en continu	En place	Bonnes	bonne	Jusqu'à présent, des capacités supérieures à 200 000 t /an sont atteintes	Potentiel d'amélioration

Convertisseur à fusion éclair en continu Kenneth/Outokumpu	En fonctionnement sur 1 site. Un deuxième site commandé	Bonnes	bonne	Capacités de production élevée justifiées par le niveau d'investissement	Potentiel d'amélioration important
Convertisseur continu Noranda	Récemment mis en service à Horne, à l'échelle industrielle	Bonnes	Aucune donnée disponible pour l'analyse finale	Aucune donnée disponible pour l'analyse finale	Potentiel effectivement disponible, devant être évalué lorsque les données seront disponibles.

Tableau 3.1 : Technologies de fusion du cuivre primaire**[tm 137 Copper Expert Group 1998]**

Les différences entre ces procédés peuvent être considérables, notamment en ce qui concerne la position des points d'injection du mélange air/oxygène ou du combustible. Certains procédés fonctionnent en discontinu. Les fours à bain fondu sont généralement utilisés avec un four de maintien ou une chambre de décantation. Des descriptions générales en sont données dans le Chapitre 2, notamment [tm 137, Cu Expert Group 1998].

La fusion éclair est réalisée soit dans un four de fusion éclair Outokumpu ou INCO [tm 22, EC 1991 ; tm 26, PARCOM 1996], soit dans un four cyclone (Contop). Les procédés Outokumpu et cyclone utilisent un enrichissement en oxygène et le procédé INCO utilise de l'oxygène industriel. La fusion éclair repose sur le grillage et la fusion du concentré sec présent dans les particules en suspension dans l'air. Les particules ayant réagi tombent dans une chambre de décantation où se produit la séparation de la matte et du laitier. Un apport de combustible dans la chambre de décantation est parfois nécessaire pour maintenir la température.

La matte et le laitier sont ensuite coulés et soumis à d'autres traitements et les gaz passent du four à un échangeur thermique via une chambre verticale.

Outre les techniques mentionnées ci-dessus, d'autres techniques peuvent être rencontrées ailleurs dans le monde, techniques entrant dans les catégories de fusion en bain fondu ou de fusion éclair [tm 137, Copper Expert Group 1998].

Des convertisseurs rotatifs à soufflage par le haut (procédé Top Blown Rotary Converter - TBRC) ont également été utilisés par le passé pour la fusion du cuivre primaire. Ils ne sont plus utilisés actuellement, la raison principale étant leurs coûts d'exploitation élevés.

Le four à réverbère est également utilisé pour la fusion de la matte, mais pas au sein de l'UE. Il n'utilise pas le contenu énergétique du soufre et du fer présents dans le concentré et repose sur l'utilisation d'un combustible fossile pour réaliser la fusion des concentrés par balayage des gaz de combustion chauds situés au-dessus de la sole. Par conséquent, ce procédé n'est pas aussi efficace que les autres procédés décrits. Les gaz de combustion augmentent le volume total des gaz et n'engendrent qu'une teneur très faible en dioxyde de soufre, qui est très difficile à éliminer efficacement. L'utilisation des fours à réverbère a considérablement diminué depuis les années 1970. La teneur en SO₂ des effluents gazeux est normalement très faible, de sorte qu'ils ne peuvent pas être traités dans une usine de fabrication d'acide.

Procédé	Nombre de fonderies utilisant cette technologie	Nombre de fours	Production de blister 1998 (en milliers de t/an)
Fusion éclair Outokumpu	26	26	3 801
Fusion éclair Outokumpu, blister direct	2	2	238
Four réverbère	27	37	1 604
Réacteur El Teniente	7	12	1 344
Four électrique	6	8	560
Haut-fourneau	14	29	548
Procédé Mitsubishi	4	4	497
Fusion éclair Inco	3	3	448

Procédé Vanuvkov	3	5	448
ISA Smelt	3	3	269
Réacteur Noranda	2	2	197
Contop	1	1	116
Procédé Bayin	1	1	57
Kivcet	1	1	15

Tableau 3.2 : Utilisation mondiale des technologies de fusion

3.1.1.1.2 Conversion

Deux types de procédés de conversion sont utilisés : - le procédé de conversion en discontinu classique, qui est le plus couramment utilisé, et le procédé de conversion en continu [tm 137 Copper Expert Group 1998].

- **Conversion en discontinu**

Le procédé de conversion en discontinu comporte deux étapes. Il est réalisé en injectant un mélange d'air et d'oxygène dans la matte obtenue lors de l'opération de fusion. Un four de bain cylindrique est utilisé dans la plupart des cas [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996] et un apport de fondants est effectué. Dans un premier temps, le fer et une partie du soufre sont oxydés et un laitier et du dioxyde de soufre se forment. Le laitier est périodiquement écrémé et subi une autre transformation afin d'en récupérer le cuivre. Normalement, la première injection est effectuée en plusieurs étapes par ajouts successifs de matte. Dans un deuxième temps, c.-à-d. la phase de soufflage du cuivre, le sulfure de cuivre est oxydé pour obtenir du cuivre blister (98,5 % Cu) et davantage de dioxyde de soufre se forme. Le blister est coulé au terme de la phase de soufflage du cuivre. Ce procédé est utilisé pour contrôler le soufre et l'oxygène résiduels présents dans le blister. Le dioxyde de soufre ainsi formé est soumis à une autre transformation destiné à récupérer le soufre, normalement dans une usine de fabrication d'acide sulfurique.

La réaction est fortement exothermique et permet ainsi de volatiliser les impuretés métalliques telles que le plomb et le zinc qui sont alors captées dans un dispositif de dépollution, puis récupérées. La chaleur du procédé peut également être utilisée pour procéder à la fusion des déchets d'anode et des autres déchets de cuivre sans devoir ajouter de chaleur primaire. On peut constater des variations dans les concentrations en dioxyde de soufre lors des différentes étapes de conversion en fonction du type de four utilisé.

Les convertisseurs de type Peirce-Smith (P.S.) et Hoboken fonctionnent en discontinu (ils sont dénommés « convertisseurs Peirce-Smith ou équivalent » dans ce chapitre). Ce sont des fours à bain cylindriques dotés de tuyères disposées latéralement permettant l'injection du mélange air/oxygène [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996]. Le four ISA-Smelt a également été utilisé pour la conversion en discontinu de la matte en cuivre blister.

Les convertisseurs rotatifs à soufflage par le haut (procédé Top Blown Rotary Converter - TBRC) ont été utilisés par le passé pour la conversion en discontinu du cuivre primaire en blister ; ce n'est désormais plus le cas.

- **Conversion en continu**

Les procédés de conversion en continu utilisés dans l'industrie sont le four de conversion flash Kennecott / Outokumpu [tm 53 et tm 67 Kennecott 1997 ; tm 63 Outokumpu 1995], le four Mitsubishi (qui fait partie du procédé Mitsubishi intégré) et – très récemment - le convertisseur Noranda [tm 137 Copper Expert Group 1998].

Les convertisseurs Mitsubishi et Noranda reçoivent une charge liquide en vue de sa conversion. En revanche, le procédé Kennecott/Outokumpu possède les caractéristiques suivantes : - La matte provenant d'un four de fusion est tout d'abord granulée dans de l'eau, broyée et séchée. Le matériau est alors mélangé à des agents scorifiants et chargé dans le brûleur de concentrés d'un four de fusion flash spécifique utilisant une atmosphère riche en oxygène ; la conversion a lieu au niveau des

particules en suspension dans l'air. Ce procédé génère une concentration élevée et constante en dioxyde de soufre qui est récupéré. Le laitier et le blister sont coulés afin d'être soumis à un traitement supplémentaire. L'utilisation de la matte du fond permet à la qualité de la matte d'être ajustée avec la vitesse de chargement et le degré d'enrichissement en oxygène de manière à produire une efficacité de conversion optimale et permet également aux étapes de production de la matte et aux étapes de conversion d'être découplées.

Il existe des différences significatives entre les modèles de convertisseurs en discontinu et en continu tant en termes de fonctionnement que de variations des émissions de dioxyde de soufre au cours des cycles de conversion. On constate également des variations concernant la facilité avec laquelle les fumées sont recueillies lors du chargement et la capacité à fondre les déchets d'anode. Certains fours utilisent des poches de coulée pour le transfert de la matte, du laitier et du blister et, en conséquence, des émissions fugitives peuvent se produire. Dans un cas, les gaz de ventilation provenant de la partie latérale du convertisseur sont collectés et traités ; dans l'autre cas, un système auxiliaire intelligent de collecte des fumées est utilisé [tm 201, Velten 1999].

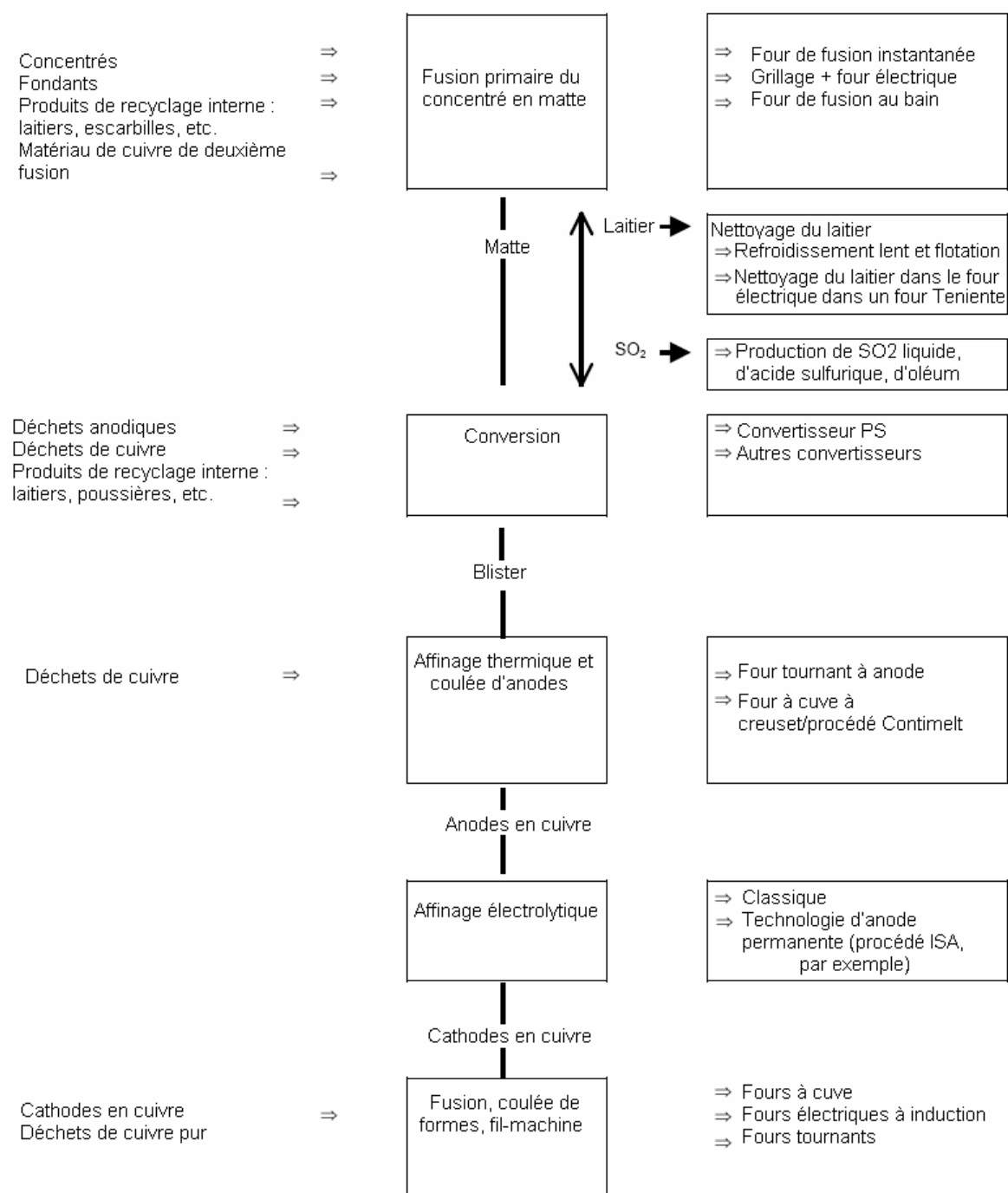


Figure 3.1 : Processus de production du cuivre primaire

3.1.1.1.3 Affinage thermique

Ceci est une étape de purification supplémentaire appliquée au métal brut (cuivre blister) produit lors de la phase de conversion. La phase d'affinage implique l'ajout d'air, puis d'un agent réducteur (hydrocarbures, par exemple) pour réduire les différents oxydes présents [tm 22, EC 1991 ; tm 26, PARCOM 1996 ; tm 92 Copper Expert Group 1998].

L'affinage thermique s'obtient en commençant par injecter de l'air dans le métal en fusion afin d'oxyder les impuretés et d'éliminer les dernières traces de soufre : une petite quantité de laitier est ainsi produite. Une source d'agent réducteur (gaz naturel, propane, etc.) est alors ajoutée pour réduire tout oxyde de cuivre formé. De l'ammoniac peut aussi être utilisé comme agent réducteur, mais on a

constaté qu'il augmentait les niveaux de NO_x [tm215, Mining Engineering, Juillet 1999]. D'un point de vue historique, des perches en bois étaient utilisées comme source d'agent réducteur (et sont toujours utilisés dans un rare nombre de cas) ; ce procédé est par conséquent appelé « perchage ». Plusieurs installations utilisent une post-combustion pour traiter les gaz lors de la phase de perchage. Dans les fonderies primaires et dans certaines fonderies de deuxième fusion, des fours tournants cylindriques (fours à anode) sont utilisés pour l'affinage thermique. Ces fours sont similaires au convertisseur Peirce-Smith et utilisent des tuyères pour les injections de gaz. Ils sont chargés de cuivre en fusion. Certains procédés de seconde fusion utilisent un four à réverbère doté de lances de soufflage pour les injections d'air. Ces derniers sont chargés avec le cuivre provenant du convertisseur et des déchets de cuivre. Certains fours à réverbère sont inclinables et équipés de tuyères.

Le système Contimelt est également utilisé pour l'affinage thermique lorsque la charge est solide et a besoin d'être préalablement fondue. Lors de la production de produits semi-finis, l'affinage thermique est aussi parfois réalisé. Des combinaisons de fours à cuve à sole (pour la fusion en discontinu) et de fours tournants (pour la réduction en discontinu) sont également utilisées. Ces systèmes peuvent être appliqués pour les matériaux primaires (blister) et secondaires (déchets).

Le métal provenant du four à anode est alors coulé dans des moules en forme d'anode. La technique la plus couramment utilisée est une roue de coulée qui comporte une série de moules en forme d'anode disposés sur la circonférence d'un plateau tournant. Une quantité précise de métal en fusion est coulée dans les moules de manière à obtenir une épaisseur d'anode constante et la roue tourne en soumettant les anodes à une série de jets d'eau destinés à les refroidir.

Comme alternative aux moules montés sur un système de roue, des anodes sont également produites en continu au moyen d'une machine de coulée continue Hazelett à double bande. Une lame de cuivre dotée de l'épaisseur d'anode désirée est produite. À partir de cette lame, des anodes peuvent être obtenues en découpant cette dernière selon la forme traditionnelle d'une anode ou, s'agissant du système « Contilnode », en coulant des bornes d'anode dans des moules latéraux spéciaux espacés selon un intervalle défini dans la machine de coulée. Les plaques anodiques préformées sont découpées au moyen d'un chalumeau à plasma ou de cisailles spéciales. L'avantage de cette méthode est l'uniformité des anodes produites ; cependant, ce système nécessite un entretien rigoureux et les coûts d'exploitation en sont comparativement plus élevés.

3.1.1.1.4 Raffinage électrolytique

On utilise une cuve d'électrolyse constituée d'une anode en cuivre coulé et d'une cathode, placées dans un électrolyte contenant du sulfate de cuivre et de l'acide sulfurique. La cathode est soit une mince découpe de cuivre pur (feuille de départ), soit une feuille de formage en acier inoxydable – plaque cathodique permanente (procédé Mount ISA et système Noranda/Kidd Creek) [tm 22, EC 1991 ; tm 26, PARCOM 1996 ; tm92, Copper Expert Group 1998]]. À haute densité de courant et basse tension, des ions de cuivre sont dissous au niveau de l'anode impure et passent en solution d'où ils sont déposés sur la cathode. Le cuivre est supprimé de l'anode dans la mesure où l'anode restante est toujours suffisamment solide pour ne pas se désagréger. L'anode restante est alors recyclée dans le procédé de production, généralement le convertisseur, afin de refroidir la réaction et de récupérer le cuivre. Lorsque des plaques anodiques permanentes sont utilisées, les dépôts de cuivre pur peuvent être arrachés, puis comme pour les plaques cathodiques en cuivre solide, fondus et coulés dans la forme requise.

Lors de l'affinage électrolytique, d'autres métaux contenus dans les anodes sont séparés, des métaux solubles tels que le Ni sont dissous dans l'électrolyte et des métaux insolubles comme les métaux précieux, le Se et le Te forment une boue anodique qui se dépose dans les cuves d'électrolyse. Les boues anodiques sont périodiquement éliminées des cuves et les métaux d'intérêt sont récupérés (cf. Chapitre 6 ; métaux précieux).

Une partie de l'électrolyte est enlevée du système. Le cuivre est éliminé par extraction électrolytique ou, dans certaines usines, une partie est récupérée sous forme de sulfate de cuivre. L'évaporation, la cristallisation et autres affinages permettent de récupérer le nickel sous forme de sulfate de nickel. Les

techniques suivantes sont utilisées pour le traitement et l'élimination de l'arsenic : - Extraction par solvant ; Précipitation lors de l'extraction électrolytique finale du cuivre ; Précipitation à partir des « acides noirs ». Dans certains cas, de l'arséniate de cuivre est produit et convertie en arséniate de cuivre et chrome afin d'être utilisé comme produit de conservation du bois.

L'élimination des impuretés lors de l'affinage électrolytique a pour but de produire une cathode de d'une qualité au moins égale voire supérieure à la norme de qualité « grade A » établie par le London Metal Exchange. Le tableau suivant contient un exemple de la composition d'anode et de la qualité de cathode obtenues. Il convient de noter que la quantité d'impuretés présente dans l'anode affecte la qualité de la cathode ; la quantité d'impuretés présente dans les anodes dépend également de la source du concentré ou du matériau de deuxième fusion.

Élément	Teneur dans l'anode (en g/t)	Teneur dans la cathode (en g/t)
Argent	600 - 720	9 - 10
Sélénium	50 – 510	< 0,5
Tellure	20 – 130	< 0,5
Arsenic	700 - 760	< 1
Antimoine	330 – 700	< 1
Bismuth	60	< 0,5
Plomb	990 – 500	< 1
Nickel	1 000 – 5 000	< 3
Note. * La qualité de l'anode dépend du contenu des matières premières.		

Tableau 3.3 : Exemple d'élimination des impuretés lors d'un affinage électrolytique

[tm 124, DFIU Cu 1999]

La tendance actuelle consiste à utiliser des cuves plus grandes dotées d'un plus grand nombre d'électrodes destinées à être utilisées dans la raffinerie électrolytique et à utiliser des gabarits de cathode en acier inoxydable [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Une efficacité accrue est constatée lorsque ces facteurs sont associés à un bon contrôle de la qualité des anodes. Le contrôle de la qualité est nécessaire pour garantir que les anodes sont droites, plates, assurent une bonne conduction de l'électricité et ont fait l'objet d'un affinage thermique adéquat. De même, on constate également une amélioration de la qualité de la cathode en utilisant des feuilles en acier inoxydable car moins d'impuretés sont mécaniquement transportées et par conséquent incorporées dans la cathode. Ces feuilles cathodiques génèrent une augmentation du rendement en courant, qui atteint alors 97 %, voire plus. Les raffineries électrolytiques modernes utilisent un degré élevé d'automatisation pour les changements de cathode et d'anode et pour l'arrachage des dépôts à la cathode provenant des plaques cathodiques permanentes [tm 22, EC 1991 ; tm 26, PARCOM 1996]. Des feuilles de départ constituées de cuivre préparé mécaniquement peuvent également être utilisées à la place des feuilles en acier inoxydable.

3.1.1.1.5 Traitement du laitier

Le laitier produit lors de la fusion primaire avec des qualités de matte élevées et lors des étapes de conversion est riche en cuivre et est soumis à un certain nombre de procédés de traitement du laitier [tm 92, Copper Expert Group 1998]. L'un de ces procédés consiste à utiliser un four électrique pour faire réagir le laitier avec du carbone sous forme de poussières de coke ou les électrodes elles-mêmes et pour la décantation de la matte de cuivre ainsi formée afin de produire un laitier inerte. Les fours électriques peuvent fonctionner en continu ou en discontinu. Le laitier du convertisseur peut également être renvoyé directement dans le four électrique de traitement du laitier ou dans le four de fusion. Alternativement, des procédés de flottation sont également utilisés après le lent refroidissement, le broyage et le concassage du laitier. Le concentré de flottation ainsi obtenu est riche en cuivre et est

renvoyé dans la fonderie. Cette méthode n'est utilisée que lorsqu'il y a suffisamment d'espace disponible et lorsque les résidus peuvent être traités et éliminés de manière adéquate.

Un traitement au four électrique du laitier venant du four de fusion et une manipulation séparée du laitier venant du convertisseur par refroidissement lent et par flottation sont également pratiqués. Le laitier provenant des procédés de traitement du laitier sont utilisés pour des projets de génie civil, de construction de routes, d'aménagement de berges et autres applications similaires ainsi que pour le grenailage. Il possède souvent des propriétés supérieures à celles des matériaux alternatifs.

D'autres laitiers riches en cuivre comme le laitier issu de l'affinage sont normalement réintroduits dans une étape antérieure du procédé, la plupart du temps la conversion, ou, dans les fonderies de deuxième fusion, à l'étape de la fusion.

3.1.1.2 La méthode hydrométallurgique

Ce procédé est généralement appliqué aux minerais oxydés ou aux minerais mixtes oxydés/sulfurés sur le site minier lorsqu'il y a suffisamment d'espace pour former les zones de lixiviation et de transformation. Ce procédé est particulièrement utile pour les minerais difficiles à concentrer par des moyens conventionnels et qui ne contiennent pas de métaux précieux [tm 55 et tm 56 Outokumpu 1997 ; tm 137, Copper Expert Group 1998]. Certains procédés brevetés sont en cours de développement et seront traités ultérieurement dans la section consacrée aux techniques émergentes.

La méthode hydrométallurgique implique le concassage du minerai, suivi d'une lixiviation à l'aide d'acide sulfurique, parfois en présence d'espèces biologiques, en utilisant des procédés de mise en tas, de mise en cuve ou d'agitation [tm 137, Cu Expert Group 1998]. La solution produite lors de la lixiviation est alors clarifiée, purifiée et concentrée au moyen d'une extraction par solvant. Le schéma de production hydrométallurgique générique est indiqué ci-dessous.

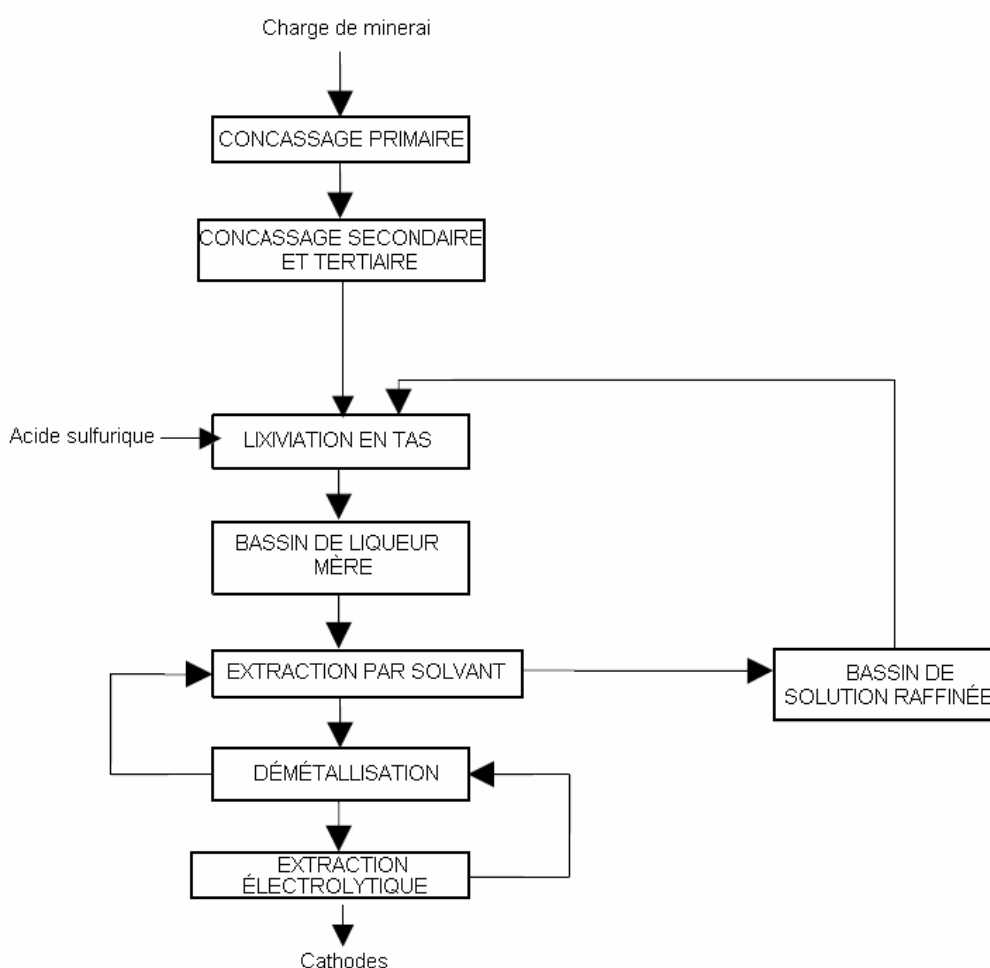


Figure 3.2 : Schéma de production d'un procédé de lessivage en tas

[tm 140, Finland Cu 1999].

Le cuivre est alors retiré par extraction électrolytique. Le procédé d'extraction électrolytique diffère du procédé d'affinage électrolytique au niveau de la forme de l'anode. L'extraction électrolytique utilise une anode inerte en plomb ou en titane, par exemple, et les ions métalliques sont supprimés de la solution et déposés sur la cathode de la même manière que lors de l'affinage électrolytique. Les cathodes sont alors décapées de la même manière que si des découpes cathodiques permanentes sont utilisées. L'électrolyte circule à travers une série de cuves et est finalement débarrassé du cuivre qu'il contient. L'électrolyte est alors renvoyé dans le circuit d'extraction par solvant. Un prélèvement est généralement effectué sur certains électrolytes afin de contrôler les impuretés susceptibles d'avoir été transportées lors de l'extraction par solvant.

3.1.2 Production de deuxième fusion

Le cuivre de deuxième fusion est produit au moyen de procédés pyrométallurgiques. Les étapes du procédé utilisé dépendent de la teneur en cuivre de la matière première secondaire, de sa distribution granulométrique et de ses autres composés [tm 92, Cu Expert Group 1998 ; tm 124, DFIU Cu 1999]. Comme lors de la production de cuivre de première fusion, différentes étapes sont nécessaires pour extraire ces composés et pour récupérer la plus grande quantité de métaux possible à partir des résidus ainsi produits.

La matière première secondaire de la charge peut contenir des matières organiques telles que des revêtements. Il peut également être huileux par nature et les installations tiennent compte de cela en ayant recours à des méthodes de déshuilage et d'élimination des revêtements ou à une conception appropriée du four et du système de dépollution. L'objectif est de s'adapter à l'augmentation de volume des gaz de combustion, de détruire les COV et de réduire au maximum la formation de dioxines ou de les détruire. Le type de prétraitement appliqué ou le four utilisé dépend de la présence de matières organiques, du type de charge (c.-à-d., la teneur en cuivre et en autres métaux et leur forme oxyde ou métal).

Si un four tel qu'un convertisseur est utilisé pour fondre les déchets de laiton impurs afin de séparer les métaux qu'il contient, les éléments d'alliage sont extraits du cuivre vers les fumées afin de produire du cuivre noir et des poussières sous filtre riche en zinc.

Une vaste gamme de matières premières secondaires est utilisée et certaines de ces matières premières sont décrites dans le tableau suivant.

Type de matériau	Teneur en cuivre (poids - %)	Sources
Boues de cuivre en mélange	2 – 25	Dépôt électrolytique
Déchets informatiques	15 – 20	Industrie électronique
Boues de cuivre non mélangées	2 – 40	Dépôt électrolytique
Matériau cuivre-fer (masse ou fragments) provenant d'armatures, de rotors, de stators, etc.	10 – 20	Industrie électrique
Scories de laiton, cendres et laitiers contenant du cuivre	10 – 40	Fonderies, usines de production de produits semi-finis
Scories de laiton rouge, cendres et laitiers contenant du cuivre	10 – 40	Fonderies, usines de production de produits semi-finis
Matériaux provenant de broyeurs	30 – 80	Unités de broyage
Radiateurs en cuivre et laiton	60 – 65	Voitures
Déchets de laiton rouge divers	70 – 85	Compteurs d'eau, roues d'engrenages, vannes, robinets, composants de machines, boîtes de roulement, hélices, garnitures
Déchets de cuivre léger	88 – 92	Tôles de cuivre, gouttières, chaudières, chauffages
Déchets de cuivre lourd	90 – 98	Tôles, découpes de cuivre, rails, câbles, tuyaux
Déchets de cuivre en mélange	90 – 95	Déchets de cuivre lourd et léger
Granulés de cuivre	90 – 98	Provenant de fragments de câble
Déchets de pureté supérieure	99	Produits semi-finis, câbles, découpes, bandes

Tableau 3.4 : Matières premières secondaires utilisées pour la production de cuivre

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Les étapes utilisées pour la production de cuivre de deuxième fusion sont généralement semblables à celles utilisées pour la production primaire, mais la matière première est généralement sous formes oxyde ou métal et les conditions du procédé sont par conséquent variées. Par conséquent, la fusion de matières premières secondaires fait appel à un milieu réducteur.

3.1.2.1 Etape de deuxième fusion

Un certain nombre de fours tels que les hauts fourneaux, les mini-fours, les convertisseurs rotatifs à soufflage par le haut (procédé Top Blown Rotary Converter - TBRC), les fours électriques étanches à arc immergé, les fours ISA Smelt, les fours à réverbère et les fours tournants sont utilisés pour les matériaux de qualité médiocre ou moyenne [tm 27, HMIP Cu 1993 ; tm 92, Cu Expert Group 1998 ; tm 124, DFIU Cu 1999]. Le type de four et les étapes du procédé utilisés dépendent de la teneur en cuivre de la matière première secondaire, de sa taille et de ses autres composés. Par conséquent, la fusion et l'affinage du cuivre de deuxième fusion est complexe et les types de matériaux de deuxième fusion pouvant être traités dépendent des installations et fours spécifiques disponibles [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Une description détaillée des fours est donnée dans la section 2.

Du fer (sous forme de cuivre ferreux, de déchets de fer ordinaire, etc.), du carbone (sous forme de coke ou de gaz naturel) et des fondants sont ajoutés afin de réduire oxydes métalliques si nécessaire et les procédés sont utilisés en fonction de la nature du matériau chargé. Les fumées provenant des fours contiennent des métaux et des oxydes métalliques volatils (zinc, plomb et étain) qui peuvent être récupérés sous forme de métal affiné, d'alliage ou d'oxyde, ainsi que des poussières, du dioxyde de soufre, des dioxines et des COV, selon les matières premières utilisées.

Le mini-four est également utilisé pour la production de cuivre de deuxième fusion à partir de déchets contenant du fer et de l'étain. Dans cette application, le fer sert d'agent réducteur lors de la première étape afin de produire du cuivre métallique, puis de l'oxygène est injecté dans la charge afin d'oxyder

le fer et les autres métaux (Pb, Sn) présents qui sont récupérés dans le laitier. L'oxydation du fer contenu dans la charge fournit la chaleur nécessaire au bon fonctionnement du procédé.

3.1.2.2 Conversion, affinage thermique, traitement du laitier et affinage électrolytique, traitement des déchets d'alliage purs

Les fours de conversion et les fours d'affinage sont très similaires à ceux utilisés pour la production primaire et les systèmes de traitement du laitier et d'affinage électrolytique sont identiques. La principale différence réside dans le fait que les convertisseurs utilisés pour la production de deuxième fusion traitent le métal, mais pas la matte. Ils utilisent du coke comme combustible pour la fusion et pour compenser les déficits en chaleur du procédé, tandis que, dans les convertisseurs primaires, la matte fournit la chaleur nécessaire au procédé [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Les convertisseurs de deuxième fusion oxydent également et transfèrent dans le laitier les éléments mineurs comme le fer et séparent d'autres métaux comme le zinc ou l'étain par volatilisation. Ils produisent un cuivre de convertisseur d'une qualité suffisante pour l'affinage thermique. La chaleur de la réaction lorsque l'air est injecté dans le convertisseur est utilisée pour volatiliser les composés métalliques, des agents scorifiants sont utilisés pour éliminer le fer et une partie du plomb. Les fours d'affinage thermique sont également utilisés pour fondre les déchets de qualité supérieure. Les commentaires exprimés concernant les émissions fugitives potentielles s'appliquent également aux procédés de deuxième fusion.

Les boues et les solutions usagées provenant de l'affinage électrolytique sont également des sources de métaux précieux et d'autres métaux tels que le nickel. Ceux-ci sont récupérés de la même manière que celle utilisée lors de la production primaire.

Des alliages de cuivre tels que les bronzes et les laitons sont également utilisés comme matières premières secondaires dans un certain nombre de procédés. S'ils sont impurs ou mélangés à différents autres alliages, ils sont traités dans les circuits de fusion et d'affinage de deuxième fusion décrits ci-dessus.

L'alliage pur est utilisé directement pour la fabrication de produits semi-finis. Des fours à induction sont utilisés pour la fusion du matériau propre, fusion qui sera suivie par un moulage dans des formes adaptées à l'étape de fabrication suivante. Une analyse et un contrôle de la charge sont effectués afin de produire l'alliage désiré sans apport majeur de métal vierge. De l'oxyde de zinc peut être recueilli dans les poussières sous filtre.

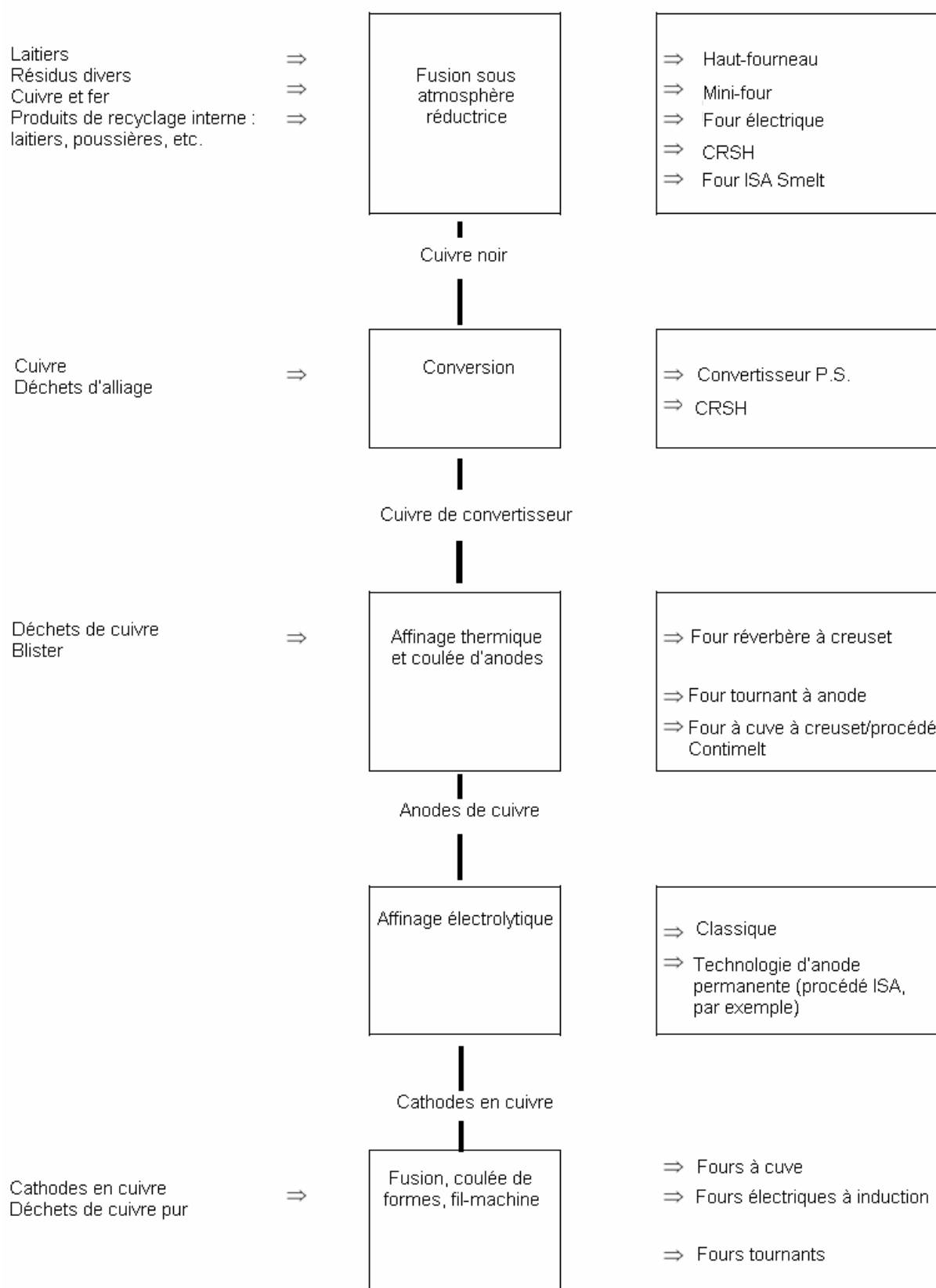


Figure 3.3 : Schéma de production de base du cuivre de deuxième fusion [FIGURE : (affinage électrolytique - ISA) anode permanente → cathode permanente]

Selon le type de charge utilisée dans certaines usines, les poussières émises lors de la première étape sont riches en zinc et en plomb (lors de la fusion de matériaux de qualité inférieure dans un haut fourneau, par exemple). Ces poussières contiennent jusqu'à 65 % de mélange de zinc et de plomb et constituent une charge parfaitement adaptée au traitement dans un haut fourneau ISF en vue de la production de plomb et de zinc.

3.1.3 Etain

L'étain est récupéré à partir des résidus générés par certains procédés d'affinage du cuivre de deuxième fusion, par désétamage des boîtes de conserve en acier revêtu, et à partir des minerais. Au moment où le présent document a été rédigé, aucun étain n'est produit directement à partir des minerais au sein de l'UE.

Dans une fonderie de cuivre de deuxième fusion, une étape de deuxième réduction est utilisée [tm 92, Cu Expert Group 1998]. Le plomb et l'étain sont réduits en présence de déchets d'acier et de cannettes en étain dans un TBRC. Des déchets de plomb/étain, du laitier et des résidus sont ajoutés afin de produire un alliage constitué d'étain et de plomb. Cet alliage est acheminé dans une poche de coulée munie d'un dispositif d'agitation afin d'éliminer les restes de cuivre, de nickel et de silicium et l'alliage décuivré est alors traité dans un système de distillation sous vide à trois étages permettant de séparer l'étain et le plomb. L'étain est affiné par cristallisation avant la seconde phase de distillation sous vide.

Une autre méthode appliquée dans d'autres fonderies de cuivre utilise les poussières émises provenant du convertisseur de cuivre de deuxième fusion (elle provient parfois également d'un haut-fourneau) comme charge. Dans un milieu réducteur, le zinc est volatilisé et récupéré sous forme d'oxyde tandis que le plomb et l'étain sont produits sous la forme d'un alliage.

Les déchets d'acier sont désétamés au moyen d'un procédé de lixiviation électrolytique ou chimique utilisant de la soude caustique et du nitrite de sodium [tm 9, HMIP-Sn 1993]. Dans ce dernier cas, de l'ammoniac est émis (0,048 kg par kg d'étain). L'étain est dissout, puis récupéré par électrolyse. L'étain est supprimé des cathodes en plongeant ces dernières dans un bain liquide d'étain. Des lingots ou de la poudre d'étain sont produits et utilisés pour produire une gamme d'alliages et de matériaux de revêtement.

L'étain est fondu dans des poches de fonderie semblables à celles utilisées pour le plomb et des alliages sont produits. Des résidus d'étain sont également récupérés lors des procédés de fusion. La gamme la plus courante d'alliages est connue sous le nom de soudures et utilise du plomb comme matériau d'alliage. D'autres fours de fusion sont utilisés, mais le contrôle de la température se révèle plus ardu.

L'étain est affiné au moyen d'un certain nombre de procédés. Un affinage électrolytique utilisant des cathodes en acier est réalisé et un procédé d'affinage pyrométallurgique peut également être réalisé d'une manière similaire à l'affinage du plomb. Dans le cas de l'affinage de l'étain, le fer est éliminé par liquation, le cuivre est éliminé par ajout de soufre et l'arsenic ou l'antimoine sont éliminés par ajout d'aluminium ou de sodium.

3.1.4 Production de fil-machine

Le fil-machine est fabriqué à partir de cathodes constituées d'un cuivre d'une grande pureté affiné au moyen d'un procédé électrolytique : ainsi, les traces d'impuretés susceptibles d'influer sur la conductivité, la capacité à être recuit et la fragilité à chaud sont réduites au maximum. Une attention particulière est portée au contrôle des conditions de fonctionnement du four afin de limiter au maximum l'absorption de l'oxygène par le métal. Les procédés suivants sont utilisés [tm 117, Copper Expert Group 1998]:

3.1.4.1 Procédé Southwire

Des fours à cuve sont utilisés pour fondre les cathodes de cuivre et les autres déchets de cuivre pur. Des capacités de fusion pouvant atteindre 60 t/h sont utilisées.

Les charges sont fondues au moyen de brûleurs alimentés par du gaz naturel, du propane ou tout autre combustible équivalent disposés en ligne autour de l'enveloppe du four. Le combustible est brûlé sous un contrôle strict des conditions de combustion afin de maintenir une atmosphère légèrement réductrice (moins de 0,5 à 1,5 % de CO ou de H₂) dans les zones où les gaz sont en contact avec le cuivre afin de réduire au maximum la teneur en oxygène du cuivre. On obtient ce résultat en contrôlant indépendamment le ratio combustible/air pour chaque brûleur grâce à une surveillance de la teneur en CO ou en H₂ des gaz de combustion provenant de chaque brûleur.

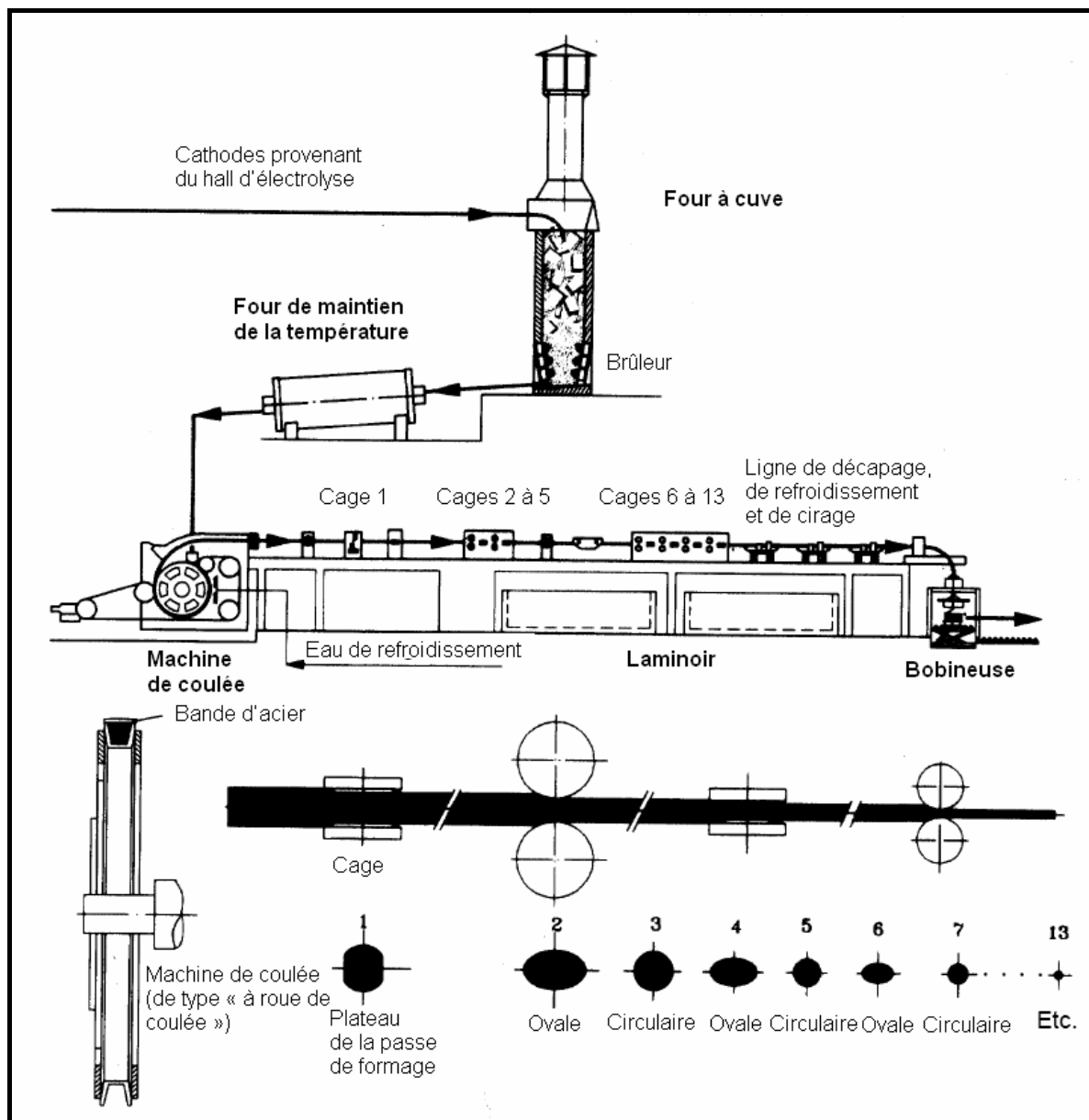


Figure 3.4 : Exemple de procédé Southwire

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Les gaz provenant du four sont refroidis et les poussières sont éliminées à l'aide de filtres à manches. Une post-combustion peut également être utilisée pour détruire le CO si la concentration est élevée. Le

cuivre en fusion est soutiré au niveau de la base du four à cuve et s'écoule vers un four cylindrique de maintien dans le but d'ajuster sa température et d'équilibrer le métal ainsi que pour une transformation métallurgique. Des brûleurs alimentés au gaz naturel permettent de maintenir la température du cuivre en fusion et une atmosphère réductrice dans les chenaux d'alimentation. Le four de maintien, qui est également alimenté au gaz naturel ou avec un autre combustible équivalent, sert de réservoir pour fournir un flux constant de métal au procédé de coulée et peut, si nécessaire, être utilisé pour surchauffer le métal.

Le cuivre en fusion s'écoule du four de maintien via un entonnoir de coulée équipé d'un dispositif de contrôle du débit vers la roue de coulée. Une bande d'acier refroidie par eau recouvre plus de la moitié de la circonférence de la roue, formant ainsi la cavité de coulée dans laquelle le cuivre en fusion se solidifie pour former une barre coulée trapézoïdale de 5 000 à 8 300 mm². De l'acétylène brûlé avec de l'air est utilisée pour produire un dépôt de suie pour la roue de coulée et la bande en acier. Après avoir été mise à niveau et ébarbée, la barre coulée est chargée par les rouleaux pinceurs dans un laminoir constitué d'une section de dégrossissage et d'une section de finition qui réduit la barre jusqu'à son diamètre final. Une émulsion d'huile minérale ou une solution aqueuse de synthèse est utilisée comme lubrifiant.

3.1.4.2 Procédé Contirod

Un four à cuve semblable à celui décrit ci-dessus est utilisé pour fondre le cuivre. Le cuivre en fusion provenant du four s'écoule via un chenal de coulée équipé de siphons dans un four tournant de maintien alimenté au gaz. Le cuivre s'écoule alors dans l'entonnoir de coulée, qui contrôle automatiquement les quantités de charge envoyées vers la machine de coulée [tm 117, Copper Expert Group 1998].

Une machine de coulée continue Hazelett à double bande est utilisée [tm 124, DFIU Cu 1999]. Les deux bandes sont refroidies au moyen d'un film d'eau continu qui se déplace à grande vitesse sur toute leur longueur. Les blocs latéraux sont automatiquement refroidis dans une zone de refroidissement spécialement conçue située sur les rouleaux de retour de la boucle. Selon la taille de l'usine, la surface de la barre coulée est comprise entre 5 000 et 9 100 mm² et les capacités de production vont de 25 à 50 tonnes par heure. La barre rectangulaire est refroidie, les quatre coins sont fraisés afin d'éliminer toute trace de bavure, puis est introduite dans un laminoir constitué de passes alternativement horizontales et verticales afin de créer un produit fini. Une émulsion d'huile minérale ou une solution aqueuse de synthèse est utilisée comme lubrifiant.

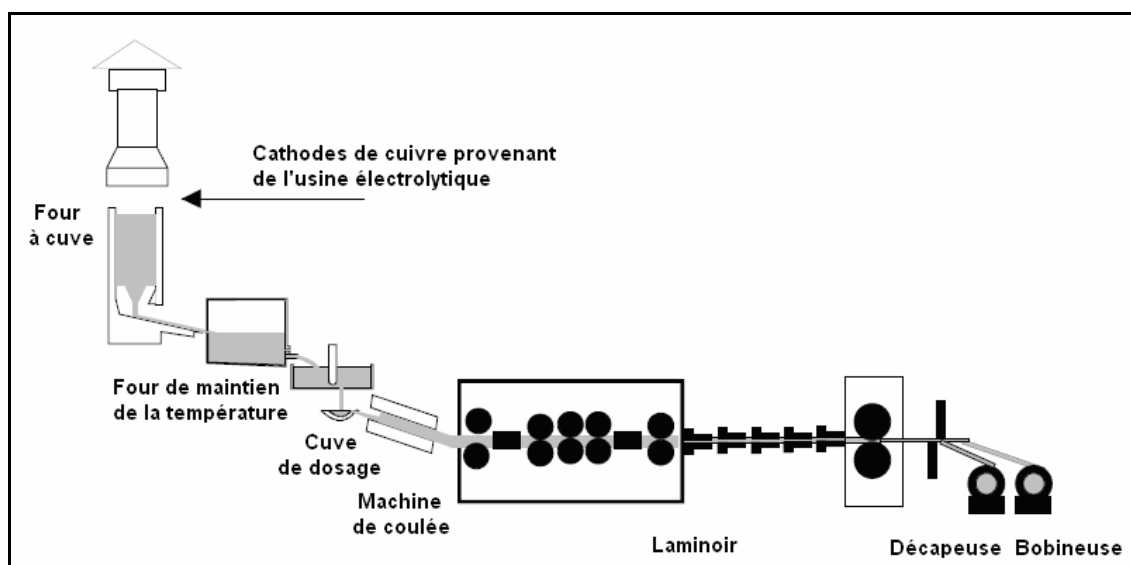


Figure 3.5 : Exemple de procédé Contirod

[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.1.4.3 Procédés Properzi et Secor

Les procédés en continu Properzi et Secor s'apparentent au concept Southwire mais comportent quelques variantes au niveau de la géométrie de la coulée [tm 117, Copper Expert Group 1998]. Les caractéristiques du procédé Southwire s'appliquent également à ces deux systèmes de fabrication de fil-machine en cuivre.

3.1.4.4 Procédé de coulée « upcast »

Le cuivre est fondu dans un four à induction à canal. Le métal en fusion est transféré de manière discontinue dans un four de maintien à induction. Pour les petites capacités de production, un four unique combiné de fusion/maintien peut être suffisant [tm 117, Copper Expert Group 1998].

La machine de coulée « upcast » est située au-dessus du four de maintien. Les moules en graphite refroidis par eau sont plongés à une certaine profondeur dans le bain et le cuivre en fusion s'écoule de manière continue dans les moules, se solidifie et est acheminé vers les rouleaux pinceurs. Le fil-machine solidifié est acheminé vers le haut par les rouleaux pinceurs.

3.1.4.5 Procédé de trempage

La charge préchauffée est versée dans un four de fusion à induction à canal. Le cuivre passe dans le four de maintien et dans le creuset qui y est installé. Une barre mère de 12,5 mm de diamètre est extraite d'un moule d'entrée situé à la base du creuset. Le tirage du fil dans le bassin de métal et le contrôle du diamètre final à travers le moule supérieur augmentent le diamètre. Le fil coulé est acheminé via des rouleaux danseurs vers un laminoir à trois niveaux produisant des barres de 8,0 et 12,5 mm [tm 117, Copper Expert Group 1998].

3.1.5 Production de produits semi-finis en cuivre et en alliages de cuivre

Le cuivre et les alliages de cuivre sont fondus de manière continue ou discontinue et coulés en vue de la production de formes adaptées à l'étape de fabrication suivante. Les produits coulés sont les précurseurs d'une variété de matériaux : feuilles, bandes, profilés, barres, fils et tubes. En règle générale, les processus suivants sont utilisés [tm 117, Copper Expert Group 1998].

1. Les billettes sont principalement fabriquées à partir de cuivre ou d'alliages de cuivre pour la production de tubes ou de profilés et de barres.
2. Les brames et les galettes sont coulés à partir de cuivre ou d'alliages de cuivre pour la production de feuilles ou de bandes.
3. Des procédés spéciaux sont appliqués pour des produits spécifiques constitués de cuivre ou d'alliages de cuivre : procédé « upcast » pour les fils et les tubes, coulée horizontale continue pour les bandes et les profilés, coulée verticale en bandes et laminage pour la fabrication de tubes de cuivre.

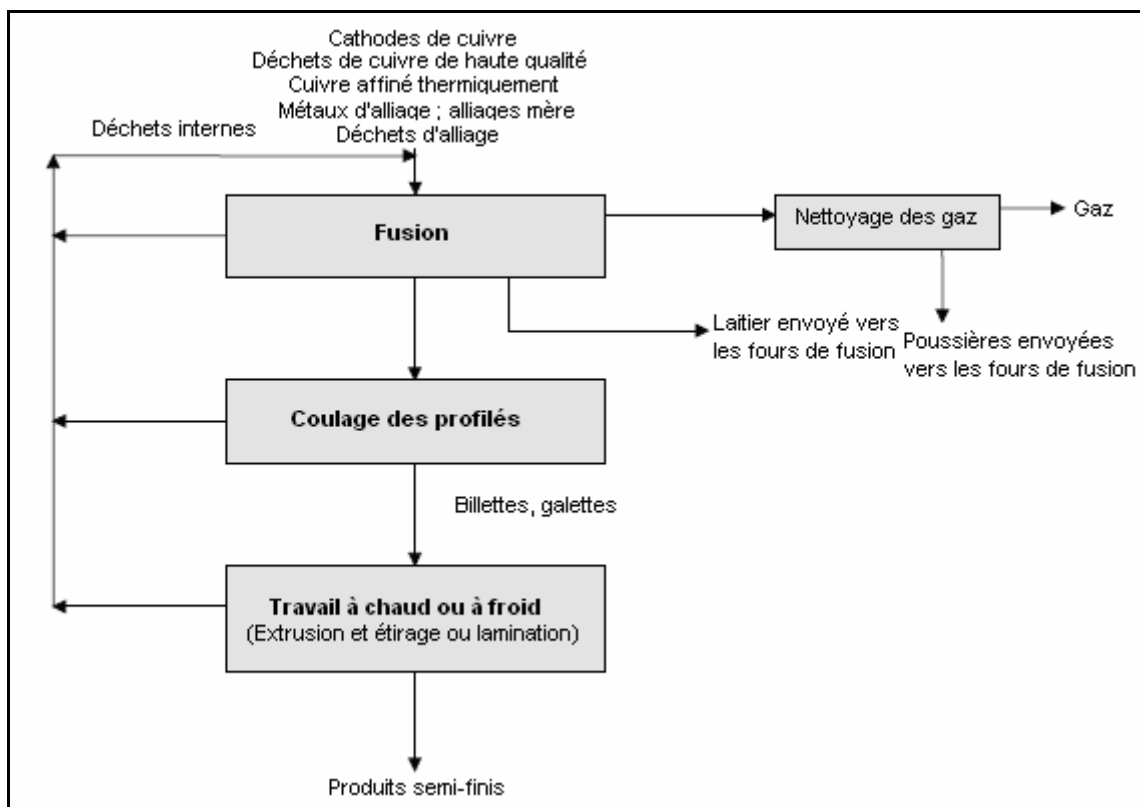


Figure 3.6 : Schéma de production général d'un produit semi-fini

[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.1.5.1 Procédés de fusion

Le cuivre ou les alliages de cuivre peuvent être fondus par lots dans un four électrique ou à induction. Lorsque des débits de métal liquide élevés sont nécessaires, le cuivre est également fondu en continu dans un four à cuve. Des fours à creusets ou à réverbère sont également utilisés pour la fusion et l'affinage thermique du cuivre. Les systèmes de collecte des fumées et de dépollution sont choisis en fonction de la matière première et du degré de contamination présent dans celle-ci. Les gaz collectés dans les fours électriques sont normalement traités par des cyclones, suivis de filtres à manches. Pour les fours à cuve alimentés au gaz, le contrôle des brûleurs est un facteur essentiel pour réduire au maximum la teneur en CO des gaz émis. Une post-combustion suivi d'un passage dans un système de récupération de la chaleur sont utilisés si la teneur en CO est suffisamment élevée ($\text{CO} > 5\%$, par exemple) ; des filtres à manches sont également utilisés pour dépoussiérer les fours à cuve.

Des cathodes en cuivre, des déchets de cuivre et d'alliages sont utilisés comme matière première et sont normalement stockés dans des baies ouvertes de manière à ce que les différents alliages puissent être mélangés afin de produire l'alliage final. Ce pré-mélange est un facteur important pour réduire le temps nécessaire à la préparation de la charge, ce qui a pour effet de réduire la quantité d'énergie consommée et le recours à des alliages mères coûteux. Dans les fours à induction, les déchets sont découpés en petits morceaux afin d'améliorer l'efficacité de la fusion et de permettre un déploiement aisé des hottes, etc.

Les matières premières peuvent également être du laitons ou des tournures de cuivre, et dans ce cas, elles sont recouvertes de lubrifiants. Un soin particulier est apporté à la prévention des fuites d'huile dans les zones de stockage et à la contamination du sol et des eaux de surface. De même, des sécheurs de tournures ou d'autres fours et des méthodes de déshuilage par voie aqueuse ou par solvant sont utilisées pour éliminer les lubrifiants et autres agents contaminants organiques.

Lorsque du laiton ou du bronze est fondu, le zinc est vaporisé hors du four : un bon contrôle de la température permet de limiter ce phénomène. La fumée est collectée par le système d'extraction des gaz et éliminée dans un filtre à manches. L'oxyde de zinc est normalement récupéré. Un certain degré d'affinage thermique est également réalisé et les fumées en résultant sont prises en compte lors de la conception des systèmes de collecte et de dépollution des fumées.

3.1.5.2 Coulée

Normalement, le métal en fusion provenant du four ou de la section de maintien de la température peut être coulé en continu ou en discontinu [tm 117, Cu Expert Group 1998]. Le procédé de coulée en continu utilise des modes verticaux ou horizontaux, mais la coulée en discontinu utilise normalement le mode vertical. Des techniques de coulée « upcast » sont également utilisées. Des billettes et des galettes/brames sont produits, puis soumis à d'autres traitements.

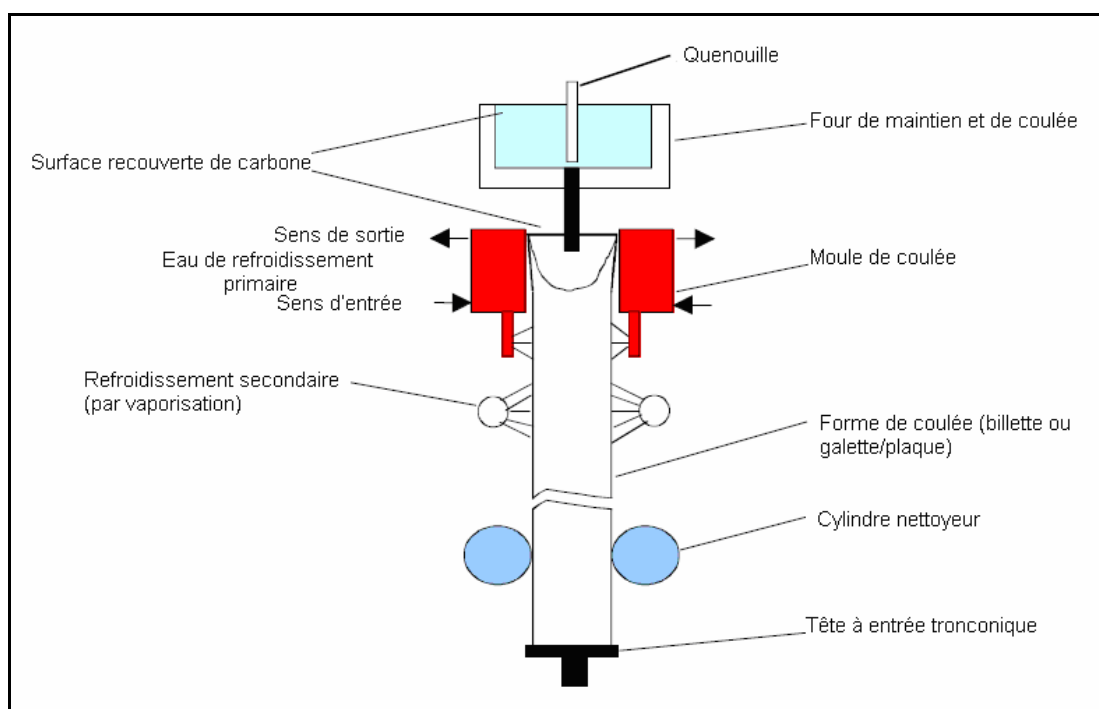


Figure 3.7 : Principe de coulée continue ou semi-continue

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Dans le cas de la production de billettes, de brames ou de galettes, le métal est fondu et passe dans une machine verticale ou horizontale à couler les billettes via un four de maintien. Des sections de billettes sont sciées avant d'être envoyés à l'étape de fabrication suivante.

Des procédés spéciaux sont appliqués pour les produits spécifiques issus du cuivre et des alliages de cuivre : procédé de coulée « upcast » pour les fils et les tubes, coulée horizontale continue pour les bandes et les profilés, coulée verticale en bandes et laminage pour la fabrication de tubes de cuivre.

3.1.5.3 Fabrication de tubes, de profilés et de barres

Les billettes de cuivre ou d'alliages de cuivre sont préchauffées, extrudées et étirées en tubes de divers diamètres et de diverses épaisseurs dans un certain nombre d'« étages ». Les machines à étirer utilisent diverses huiles et divers savons comme lubrifiant. Ces derniers contaminent les tubes et les résidus de coupe. Les produits sont normalement recuits et dégraissés avant le transport et les résidus de coupe sont déshuilés dans un four ou dans d'autres procédés de dégraissage avant d'être réintroduites dans le four afin d'y être fondues.

Des tubes de cuivre peuvent également être produits en utilisant une presse à extruder dotée d'un perceur dans laquelle les sections de billettes sont extrudées de manière à former des enveloppes de tube ; ces dernières sont alors laminées dans un laminoir pèlerin avant d'être finalement étirées jusqu'à la taille souhaitée dans des blocs de tirage. L'huile utilisée (en petites quantités) pour les opérations de tirage est neutralisée dans des systèmes de dégraissage/décapage continus souvent reliés à la section de recuit.

Les produits sont recuits dans divers fours sous atmosphère réductrice sous une atmosphère inerte telle que de l'« exogaz » ou des mélanges d'hydrogène et d'azote.

3.1.5.4 Fabrication de tôles et de bandes

Les brames/galettes de cuivre ou d'alliages de cuivre sont le matériau de base pour la fabrication des tôles et des bandes. Le matériau est préchauffé dans des fours alimentés au gaz ou à l'huile, laminé à chaud et à froid, puis acheminés vers la section de finition, qui comprend le re-laminage et la découpe à la longueur et à la largeur désirées. Le fraisage des surfaces, le recuit, le décapage, le lavage et le séchage sont des étapes intermédiaires nécessaires pour produire des bandes et des tôles de qualité supérieure [tm 117, Copper Expert Group 1998].

Le laminage à chaud est généralement effectué dans un laminoir double équipé d'établis de moulage pouvant atteindre 200 m et d'un dispositif de bobinage final. L'eau de refroidissement des rouleaux contient une petite quantité de lubrifiant afin d'améliorer l'adhérence aux rouleaux en acier. La vapeur générée est ventilée et les gaz de ventilation sont dévésiculés avant d'être émis dans l'atmosphère.

D'autres opérations de laminage à froid sont alors réalisées. Le laminage à froid permet d'obtenir un métal renforcé. Dans la plupart des cas, la bobine est recuite avant le laminage à froid. Le recuit est réalisé sous atmosphère réductrice afin d'éviter l'oxydation. Une atmosphère inerte (« exogaz » ou mélange hydrogène/azote) est utilisée. L'exogaz est produit sur place à partir de gaz naturel dans un réacteur spécial doté d'une alimentation indirecte. Du N_2 et du H_2 sont achetés et stockés sur le site dans des cuves spéciales. Les atmosphères inertes constituées d'un mélange N_2/H_2 sont produites dans des cuves de stockage en mélangeant les composés selon les proportions requises. Lorsque le recuit est réalisé avant le laminage à froid, des fours à cloche dotés d'un système de chauffage électrique ou alimenté indirectement au gaz naturel ou au fuel sont utilisés. Des fours à tour sont utilisés pour le recuit intermédiaire des bobines pré-laminées.

L'épaisseur de la feuille est à nouveau réduite au moyen d'opérations de laminage à froid par étapes sur différents laminoirs réversibles. Pour le laminage à froid, différents types de laminoirs appelés Duo, Quarto, Sexto, Sendzimir (12 rouleaux) sont utilisés. Des modèles de laminoirs à support unique combinés à des laminoirs multi-supports sont également appliqués. La combinaison de différents types appliquée dépend de l'épaisseur de la feuille sur les bobines et du degré de finition déjà atteint par la bobine.

Lors du laminage à froid, une émulsion ou une huile est utilisée pour assurer la protection du rouleau. Par conséquent, les supports de rouleau sont ventilés et les gaz de ventilation sont traités à l'aide de filtres mécaniques, de filtres électrostatiques humides ou par laveur. L'émulsion ou l'huile est éliminée du métal et les particules d'huile sont éliminées au moyen de filtres à manches ou en papier.

Laminage à chaud	
Type de laminoir	Essentiellement Duo
Dimensions de départ	250 – 130 mm d'épaisseur 450 – 1 000 mm de largeur
Dimensions finales	15 – 12 mm d'épaisseur 450 – 1 000 mm de largeur
Température	750 – 800 °C
Force de roulement	Env. 10 – 12 kN/mm de largeur de feuille
Laminage de surface	Découpe de 0,3 – 0,7 mm sur les deux surfaces.
1^{er} laminage à froid	
Type de laminoir	Essentiellement Quarto
Force de roulement	Env. 15 – 20 kN/mm de largeur de feuille
Réduction de dimensions et vitesse de roulement	Réduction de 15 à 4 mm d'épaisseur en plusieurs passages, vitesse de 100 à 200 m/min.
Ratio de conversion	70 – 80 %
Recuit (recristallisation)	
Température	550 – 600 °C
2^{ème} et dernier laminage	
Type de laminoir	Essentiellement Quarto. Egalement Sexto selon l'épaisseur de la feuille. Des supports à 20 rouleaux ont également été utilisés.
Force de roulement	Env. 2 – 10 kN/mm de largeur de feuille selon le type de laminoir utilisé.
Vitesse de roulement	Réduction de 4 à 1 mm : 300 – 500 m/min. en plusieurs passages Réduction de 1 à 0,1 mm : 500 – 1 000 m/min. en plusieurs passages
Découpage des feuilles en bandes	
Type d'équipement	Découpeuse en bandes longitudinale
Note. * Le recuit est nécessaire après chaque ratio de conversion supérieur ou égal à 70 – 80 %. Les températures de recuit choisies dépendent des propriétés du matériau à produire.	

Tableau 3.5 : Données typiques d'un procédé de production de bandes de laiton

[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.1.6 Lingots de cuivre et d'alliages de cuivre

Les lingots de cuivre et d'alliage de cuivre sont produits pour les industries de fonderie à l'aide d'un procédé de coulée en moules fixes. Une grande variété d'alliages est produite avec d'autres métaux tels que le nickel, l'étain, le zinc, l'aluminium, etc.

La production de lingots implique la production préalable d'une composition d'alliage précise. On obtient ce résultat lors des phases de réception et de stockage de la matière première par ségrégation et tri. Les vieux déchets sont normalement stockés dans des baies ouvertes de manière à ce que les différents alliages puissent être mélangés afin de produire l'alliage final. Ce pré-mélange est un facteur important pour réduire le temps nécessaire à la préparation du métal liquide, ce qui a pour effet de réduire la quantité d'énergie consommée et le recours à des alliages mères coûteux. Le cuivre et les alliages de cuivre peuvent être fondus en discontinu dans des fours tournants ou à induction. Les fours tournants sont normalement utilisés pour les déchets les plus sales. Des brûleurs d'oxycombustion sont fréquemment utilisés. Des fondants peuvent être ajoutés pour séparer les composés indésirables, notamment le fer, et le laitier est soutiré séparément du métal. Le rendement de production du métal est compris entre 70 et 97 %, mais il dépend des matières premières utilisées [tm 106, Farrell 1998].

Les systèmes de collecte et de dépollution des fumées sont choisis en fonction de la matière première utilisée et du degré de contamination constaté dans celle-ci. L'accès à un four à induction pour le chargement et la coulée implique l'utilisation d'un système de hottes amovible. Les hottes sont robustes de manière à pouvoir supporter un certain impact mécanique. Les gaz émis par les fours à

induction sont collectés et normalement traités dans des cyclones, suivis de filtres à manches. Une post-combustion suivie d'un passage dans un système de récupération de la chaleur peut être utilisée en cas de contamination organique. Alternativement, le système de contrôle de la combustion du four doit être capable de s'adapter à la combustion des agents contaminants.

Lorsque du laiton ou du bronze est fondu, le zinc est vaporisé hors du four: un bon contrôle de la température du four peut limiter ce phénomène. Les fumées sont collectées dans le système d'extraction des gaz et sont généralement éliminées dans un filtre à manches. L'oxyde de zinc est normalement récupéré. Un certain degré d'affinage thermique est également réalisé afin d'ajuster la composition de l'alliage et les fumées en résultant sont prises en compte lors de la conception des systèmes de collecte et de dépollution des fumées.

La charge du four est échantillonnée et analysée et des ajustements finaux sont apportés à l'alliage. Le métal est alors coulé dans des chenaux de coulée couverts qui alimentent une chaîne de moules à lingots. Les moules sont normalement traités avec un minéral afin d'empêcher le matériau de coller et des émissions d'huile se produisent. Cette fumée peut être collectée et brûlée.

Les lingots refroidis sont empilés, attachés et stockés à l'air libre sous forme de palettes.

3.1.6.1 Alliages mères

La charge du four est normalement pré-ajustée, mais le métal en fusion peut être transféré vers une poche de coulée ou un four de maintien de sorte que la composition de l'alliage puisse être ajustée avec précision avant la coulée. Les alliages mères tels que le CuP, le CuNi, le CuZnPb, le CuBe, etc., sont utilisés à cette fin. Ces alliages mères sont produits dans des fours similaires à ceux décrits ci-dessus, la nature des fumées et des poussières issues de la production des alliages mères influence les systèmes de contrôle, de collecte et de dépollution utilisés. Des systèmes d'exploitation et de dépollution plus performants sont particulièrement appropriés lorsque des matériaux extrêmement dangereux tels que le béryllium sont utilisés ou lorsque des matériaux réactifs tels que le phosphore sont ajoutés pour produire un alliage. Par exemple, l'alliage mère de cupro-phosphore est fabriqué de la manière suivante : -

Deux fours (des fours à induction sont couramment utilisés) fonctionnent en série. Le cuivre est fondu dans le premier four, puis transféré dans le second où du phosphore en fusion est injecté au moyen d'une lance pour former l'alliage. La vitesse d'injection est contrôlée de manière à réduire au maximum les émissions de pentoxyde de phosphore, notamment lors des dernières étapes du procédé lorsque le métal est proche de la saturation ($< 14\%P$). Le cupro-phosphore est alors coulé dans des moules. Des émissions de pentoxyde de phosphore continuent à se produire pendant le refroidissement de l'alliage si la teneur en phosphore est trop élevée.

Le pentoxyde de phosphore est très hygroscopique et, par conséquent, les fumées ne peuvent être filtrées à l'aide d'un filtre à manches classique car les fumées absorberaient l'humidité et recouvriraient les manches d'acide phosphorique. Un laveur humide classique a un effet limité car les fines fumées forment un brouillard fin et n'entrent pas en contact avec le support de lavage. Une réduction efficace de la concentration en composés phosphorés du flux de gaz peut être obtenue en utilisant des épurateurs venturi à haut rendement ou des filtres composés de feutres constitués de fibres. En théorie, un acide faible pourrait être produit en vue d'une transformation ultérieure, mais cela se révèle difficile dans la pratique.

3.1.7 Opérations de décapage

Les fils, les tubes, les bandes et certains autres matériaux sont décapés afin d'obtenir un fini brillant avant emballage ou, dans le cas de fil de cuivre, d'éliminer l'oxyde de la surface avant le tirage du fil. Des solutions d'acide sulfurique sont utilisées et parfois un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique dilués est utilisé. Dans ce dernier cas, des fumées nitriques peuvent se dégager si des acides plus puissants sont utilisés.

3.1.7.1 Décapage non acide des barres de cuivre

Ce procédé fonctionne en circuit fermé. La barre peut être décapée dans un système en ligne constitué d'un tuyau en acier horizontal divisé en compartiments. Une solution aqueuse d'alcool isopropanol (IPA) de 2,5 à 3,5 % est utilisée. Le procédé de conversion de l'oxyde de cuivre s'équilibre avec l'alcool pour former du cuivre (partiellement laissé sur la barre) est connu sous le nom de procédé Burns [tm 117, Cu Expert Group 1998]. Dans le cadre de la fabrication de fil-machine de cuivre, la pratique normale consiste à recycler la solution après élimination des boues de cuivre par décantation ou filtration ; la concentration en IPA est ajustée, selon les spécifications requises.

Après le décapage, la barre est séchée au moyen d'air comprimé. Elle est ensuite enduite d'une cire appliquée par pulvérisation fine d'une émulsion de cire à 4 % qui empêche l'oxydation de la surface de la barre. La barre est rembobinée sur des palettes en bois, puis compactée, cerclée et enveloppée dans une feuille en plastique.

3.1.7.2 Décapage acide des barres de cuivre et des produits semi-finis en cuivre et en alliages de cuivre

a) Fil-machine de cuivre

Le décapage acide du fil-machine de cuivre utilise un tuyau horizontal en acier inoxydable divisé en compartiments [tm 117, Cu Expert Group 1998]. Dans un premier temps, le fil est décapé avec de l'acide sulfurique dilué ; puis, l'acide résiduel est éliminé de la surface du fil en plusieurs étapes par vaporisation d'eau, puis par séchage à l'aide d'air comprimé et d'un revêtement de cire.

Alternativement, après un refroidissement partiel dans un long tube rempli d'eau, une forme de spirale correspondant au diamètre de la bobine est donnée au fil. Ces spirales sont étalées sur une table de laminage où la température est ramenée à 20 °C au moyen de pulvérisateurs d'eau. Un convoyeur d'alliage résistant aux acides achemine ces spirales dans les cuves de décapage où le fil est décapé à l'aide d'une solution d'acide sulfurique à 20 %. Le système de décapage par bain acide permet une élimination parfaite de tous les oxydes qui se sont formés à la surface du fil. Les boucles sont alors lavées avec une eau de rinçage, puis protégées au moyen d'une solution à base de cire.

Un affinage électrolytique est réalisé pour récupérer le cuivre dissout par l'acide de décapage. La solution de lavage peut également être transférée dans une cuve électrolytique située sur le même site ou traitée par échange d'ions.

b) Produits semi-finis en cuivre et en alliages de cuivre

Le décapage de la surface des feuilles et des bandes est généralement réalisé à l'aide d'acide sulfurique (8 – 10 %), mais pour certains alliages spéciaux, des mélanges d'acide sulfurique et d'acide nitrique sont utilisés dans des lignes en continu ou dans des systèmes automatiques. Un traitement des gaz est utilisé pour éliminer les fumées d'acide nitrique. L'acide est remplacé périodiquement de manière à s'assurer que la qualité de la surface n'est pas altérée.

L'acide usagé est envoyé dans des unités de traitement internes ou externes afin d'y être traité et afin de récupérer les métaux qu'il contient. Les systèmes de décapage sont ventilés de manière à assurer la sécurité des ouvriers. Les produits sont rincés et l'eau de rinçage est envoyée dans une unité de traitement, les boues sont, si possible, recyclées. Pour le dégraissage de la surface des produits laminés, des détergents à base d'eau sont utilisés. L'eau usagée est traitée par ultrafiltration.

3.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les principaux problèmes environnementaux de l'industrie du cuivre raffiné sont la pollution de l'air et de l'eau [tm 28, WRC 1993 ; tm 210, Copper Expert Group 1999]. Les installations sont généralement équipées de leurs propres installations de traitement des eaux usées et un recyclage des eaux usées est généralement effectué. La plupart des déchets potentiels sont réutilisés.

Certains aspects locaux, tels que les nuisances sonores, sont un sujet de préoccupation pour l'industrie.

En raison de la nature dangereuse de certains flux de déchets solides et liquides, il existe également un risque significatif de contamination du sol si ces déchets ne sont pas stockés et manipulés correctement.

Les émissions fugitives peuvent être très importantes. Des mesures ont été effectuées dans une grande fonderie de cuivre produisant du cuivre primaire et du cuivre de deuxième fusion. Les résultats montrent clairement que des émissions fugitives prédominent même après que des améliorations aient été apportées aux systèmes secondaires de captage des fumées [tm 161, Petersen 1999]. Dans cet exemple, les charges de poussières mesurées sont les suivantes :

	Émissions de poussières (en kg/a)	
	Avant collecte supplémentaire des gaz secondaires (1992)	Après collecte supplémentaire des gaz secondaires (1996)*
Production d'anodes (en t/a)	220 000	325 000
Émissions fugitives		
Total fonderie	66 490	32 200
Toiture de la fonderie	56 160	17 020
Émissions canalisées des fonderies primaires		
Fonderie/unité de production d'acide	7 990	7 600
Canalisées - hottes secondaires	2 547	2 116
Note. * Émissions après un investissement de dix millions d'euros dans un meilleur système de captage et de traitement des gaz fugitifs. Énergie supplémentaire = 13,6 GWh/a.		

Tableau 3.6 : Comparaison des charges de poussières éliminées et fugitives dans une fonderie de cuivre primaire

[tm 161, Petersen 1999]

3.2.1 Consommation d'énergie des procédés de production du cuivre

La plupart des étapes de la production du cuivre nécessitent de l'énergie. C'est le procédé électrolytique qui consomme le plus d'énergie [tm 26, PARCOM 1996]. Les besoins en énergie de la production (nette) pour un certain nombre de procédés utilisant du concentré de cuivre sont compris entre 14 et 20 GJ/t de cathode de cuivre [tm 210, Cu Expert Group 1999]. Le chiffre exact dépend principalement du concentré (% de soufre et de fer), mais aussi du dispositif de fusion utilisé, du degré d'enrichissement à l'oxygène et de la collecte et de l'utilisation de la chaleur produite par le procédé. Les données comparatives basées uniquement sur le type de fonderie peuvent par conséquent comporter des imprécisions. L'utilisation du contenu énergétique du concentré est plus importante et les fonderies qui adoptent un fonctionnement autogénique consomment moins d'énergie.

L'énergie consommée par la phase d'affinage électrolytique de la production du cuivre est estimée à 300 – 400 kWh par tonne de cuivre [tm 137, Cu Expert Group 1998]. Le type de cathode utilisé (acier inoxydable ou cuivre) influence principalement le rendement de la raffinerie électrolytique [tm 92, Cu Expert Group 1998] et cela peut aller de 92 à 97 % en termes de rendement du courant.

3.2.2 Données relatives aux émissions et à la consommation

Les principales sources d'émissions et de consommation pour la production de cuivre sont les suivantes : -

3.2.2.1 Données relatives aux intrants et aux sortants de la production de cuivre primaire

Les données relatives aux intrants et aux sortants d'une fonderie de cuivre primaire dépend de la teneur en cuivre du concentré, de la concentration en autres métaux (arsenic, sélénium, mercure, argent, or, etc.) et de l'utilisation de déchets de cuivre ou autres matériaux contenant du cuivre dans les diverses étapes du procédé.

Le schéma suivant illustre les données relatives aux intrants et aux sortants potentiels d'un procédé de production de cuivre primaire classique.

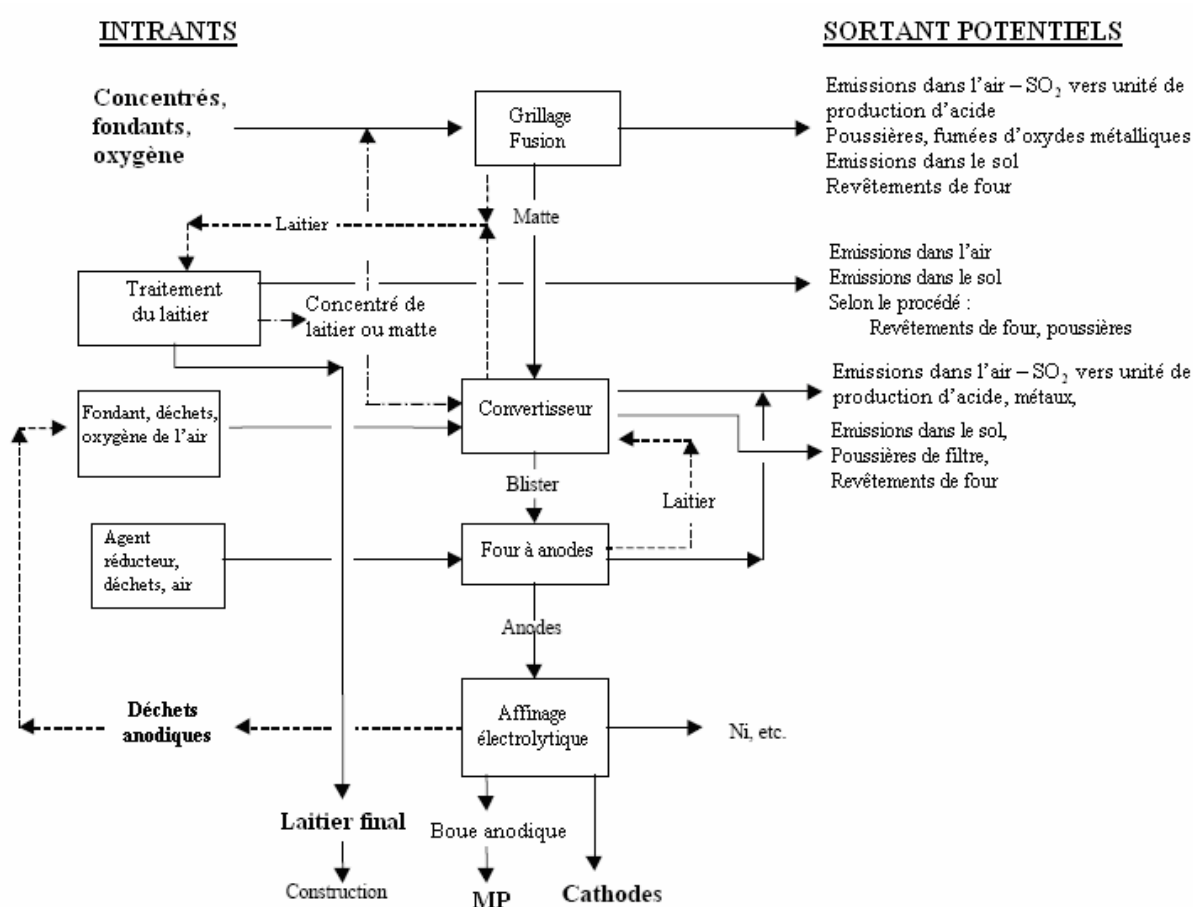


Figure 3.8 : Schéma générique des intrants et sortants pour la production de cuivre primaire

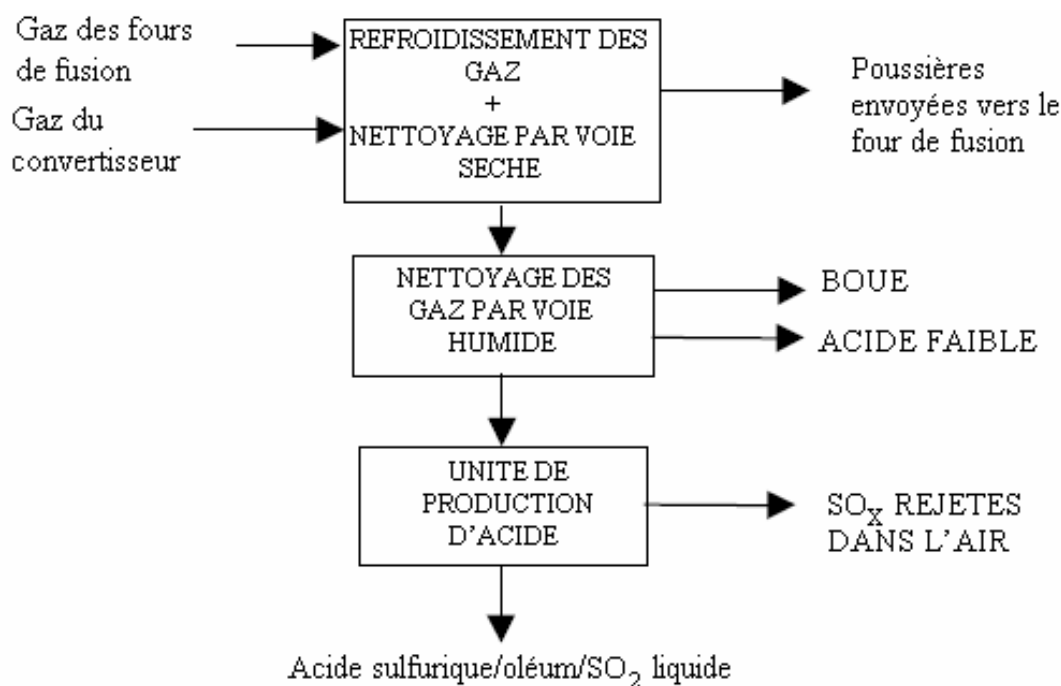


Figure 3.9 : Traitement des gaz de fusion et de convertisseur

Certaines fonderies de cuivre primaire sont intégrées à des installations de production secondaire ou à des installations de production de plomb et de poussières d'oxydes de zinc à partir de concentrés mixtes, etc. Les données relatives aux intrants et aux sortants sont, par conséquent, très difficiles à comparer. Les valeurs pour un procédé complexe sont données ci-dessous. Il convient de noter que la principale influence sur les données relatives aux intrants et aux sortants est la teneur en cuivre du concentré ou des autres matières premières et il peut ainsi y avoir des variations de données et des comparaisons qui ne sont pas pertinentes. La récupération de cuivre lors de la fusion et de l'affinage est plus significative et est supérieure à 96 %.

Matériaux entrants	Quantité [t/a]	Produits	Quantité [t/a]
Concentrés de cuivre	690 000	Cathode de cuivre	370 000
Déchets de cuivre	95 000	Sels de cuivre	6 500
Matériau broyé à partir de déchets électroniques	1 200	Sulfate de nickel	1 800
Produits intermédiaires externes	86 000	Métaux précieux	150
		Plomb affiné	9 000
		Acide sulfurique	660 000
		Laitiers	410 000

Tableau 3.7 : Exemple d'intrants et de sortants pour une raffinerie/fonderie de cuivre primaire
[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.2.2.2 Données relatives aux intrants et aux sortants de la production de cuivre de deuxième fusion

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les matières premières secondaires peuvent être utilisées dans diverses étapes des procédés de deuxième fusion en fonction de la pureté, de la teneur en autres métaux et du degré de contamination de la surface. Le degré de contamination organique affecte les émissions potentielles et, dans plusieurs étapes du procédé, des post-combustions sont utilisées pour détruire les composés organiques tels que les dioxines en fonction du degré de contamination organique présent. Le schéma suivant représente un schéma générique d'intrants et de sortants pour la production de cuivre de deuxième fusion.

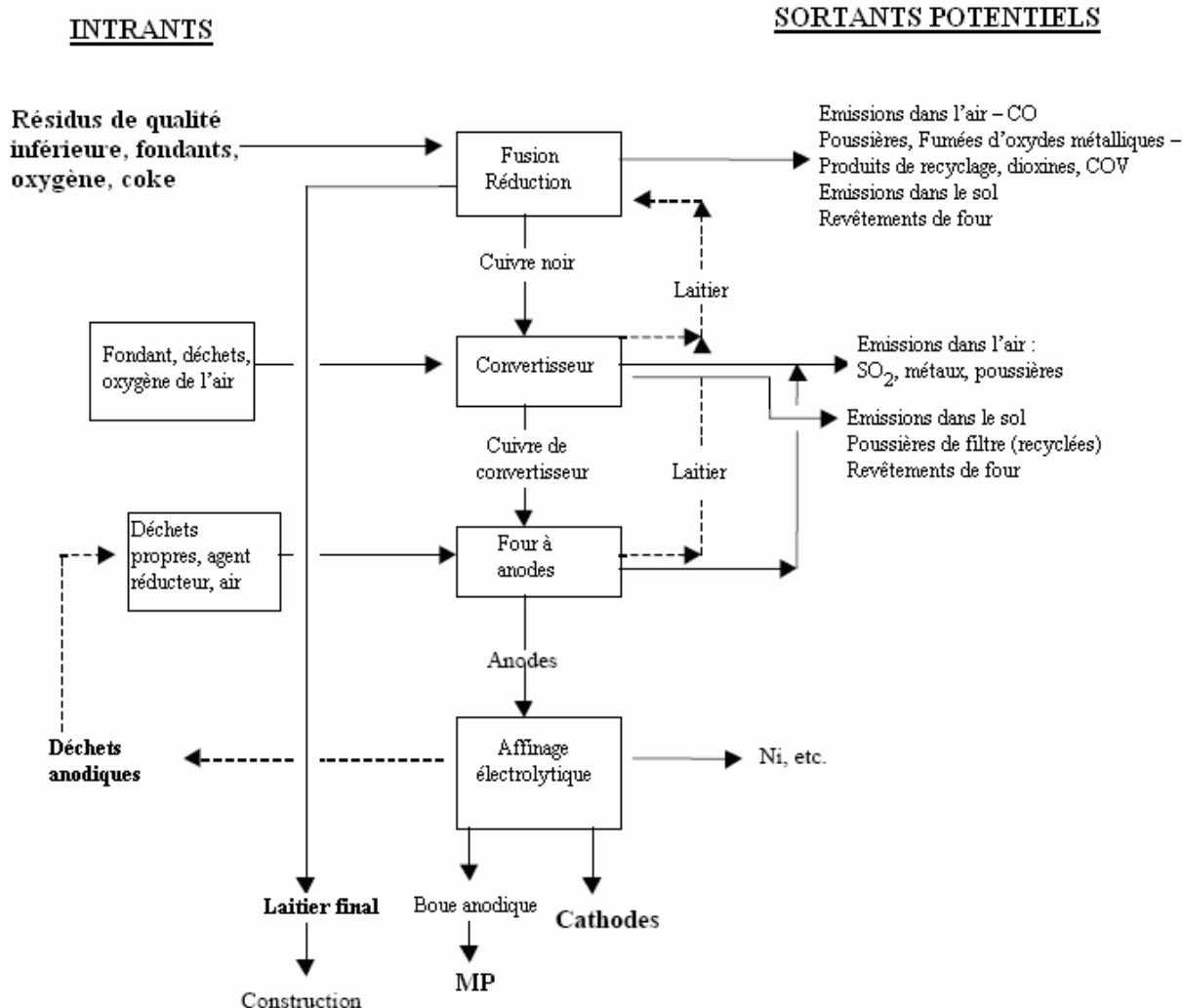


Figure 3.10 : Schéma des intrants et des sortants génériques d'une fonderie de cuivre de deuxième fusion [FIGURE (sortie fusion/réduction) : fumées d'oxydes métalliques – recyclés, dioxines, COV]

De nombreux résidus sont recyclés au sein du procédé et via d'autres procédés associés. Des producteurs de métaux non-ferreux (plomb, zinc et étain, par exemple) utilisent une grande partie de ces résidus comme matières premières pour leurs procédés. Plusieurs sites ont intégré des procédés sur site pour récupérer les autres métaux présents dans ces résidus.

Le schéma suivant donne un exemple de la manière dont la production de cuivre et d'autres métaux à partir de matières premières secondaires peut être un procédé complexe, intégré. Le tableau qui l'accompagne montre également les quantités d'intrants et de sortants associées à cet exemple spécifique.

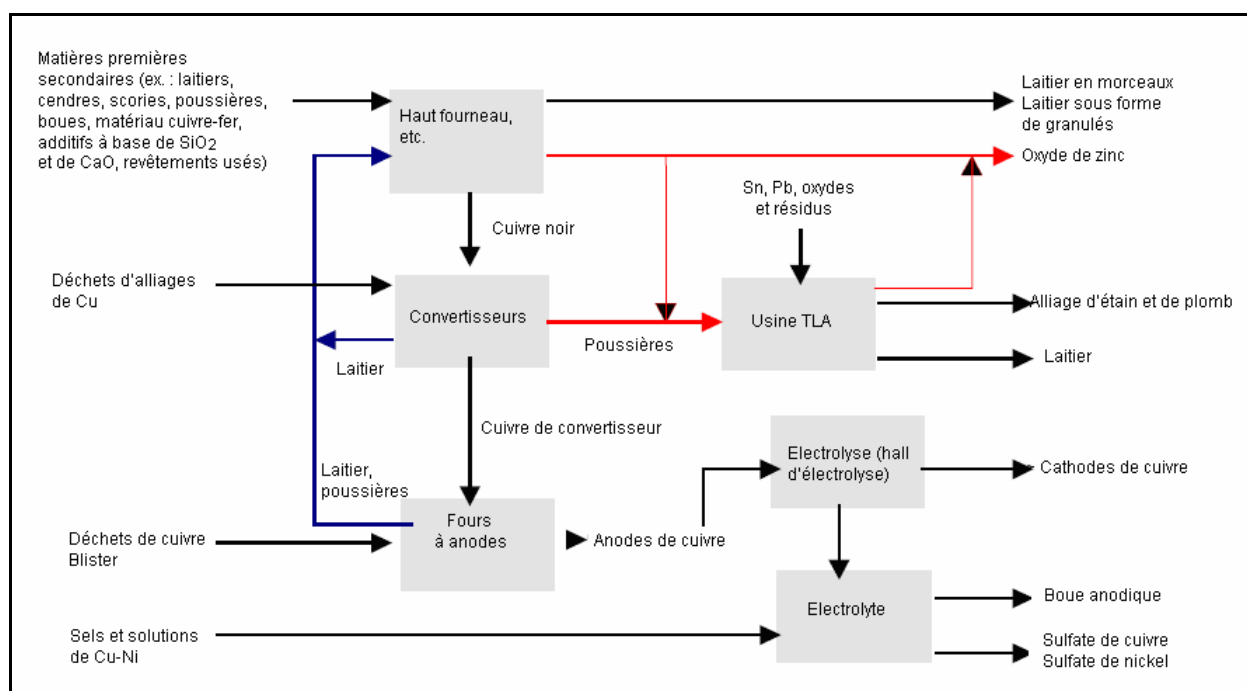


Figure 3.11: Exemple d'un schéma Intrants/Sortants pour un site de production de cuivre de deuxième fusion équipé d'un système de récupération de l'étain/du plomb [FIGURE (entrée usine TLA) : résidus et oxydes de Sn et Pb]

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Intrants	Quantité [t/a]	Sortants	Quantité [t/a]
Déchets de cuivre *)	130 000	Cathodes de cuivre	176 000
Blister	20 000	Sulfate de cuivre	2 200
Déchets d'alliage de cuivre	35 000	Sulfate de nickel	2 400
Matériaux intermédiaires externes (ex. : laitiers, poussières, cendres, boues, produits de balayage, etc.)	40 000	Oxydes de zinc	9 000
Matériaux à base de cuivre et de fer	25 000	Alliages plomb-étain	3 700
Chaux	13 000	Boue anodique	1 000
Silice	11 000	Laitier	80 000
Coke	25 000		
Charbon	13 000		
Mazout	11 000		

Note. *) y compris les déchets électroniques.

Tableau 3.8 : Données relatives aux Intrants/Sortants correspondant au schéma de production de cuivre de deuxième fusion ci-dessus

[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.2.2.3 Émissions dans l'air

De la poussière, des composés métalliques, du carbone organique (qui peut conduire à la formation de dioxines) et du dioxyde de soufre peuvent être émis dans l'air [tm 124, DFIU Cu 1999]. Les sources

potentielles et l'importance des émissions potentielles dans l'air sont indiquées dans le tableau suivant et sont traitées dans la suite de la présente section : -

Source des émissions	Poussières et composés métalliques	Dioxines	Carbone organique	Composés sulfurés
Manutention des matériaux	••			
Stockage	•			
Séchage	•••		•	•
Traitement des déchets	••	••• (deuxième fusion)	••• (deuxième fusion)	
Fusion	•••	••• (deuxième fusion)	• (deuxième fusion)	••• (Traité dans une unité de récupération)
Conversion	••	• (deuxième fusion)	• (deuxième fusion)	••• (Traité dans une unité de récupération)
Affinage	••	• (deuxième fusion)	• (deuxième fusion)	•
Fusion/coulée	• (•• pour les alliages)		• (deuxième fusion) + CO	
Transferts en poches de coulée	•••			•
Électrolyse				
Traitement du laitier	••		• CO	
Note. ••• Le plus important - • Le moins important				

Tableau 3.9 : Importance des émissions potentielles dans l'air dues aux procédés de production du cuivre de deuxième fusion

Les oxydes d'azote sont relativement insignifiants [tm 24, DFIU 1996], mais ils peuvent être absorbés dans l'acide sulfurique produit à partir d'un procédé primaire ; le recours à un enrichissement à l'oxygène peut parfois réduire la formation d'oxydes d'azote par voie thermique. Cela dépend de l'endroit où l'oxygène est ajouté, parfois une plus forte concentration en oxydes d'azote est produite en raison d'une augmentation de la température, toutefois le volume de gaz et la quantité totale sont inférieurs. Des brûleurs bas-NO_x peuvent être utilisés. La formation de dioxines dans la zone de combustion et dans la section de refroidissement du système de traitement des effluents gazeux (synthèse de novo) peut être possible. Des émissions peuvent s'échapper du procédé soit sous forme d'émissions canalisées, soit sous forme d'émissions fugitives, en fonction des systèmes de dépollution utilisés et de la qualité de l'entretien de l'usine. Les émissions canalisées sont normalement surveillées en continu ou périodiquement et le reporting est effectué à destination des autorités compétentes par le personnel du site ou par des consultants externes.

3.2.2.3.1 Monoxyde de carbone

Outre les émissions décrites ci-dessus, les procédés de fusion utilisant des fours ayant besoin de maintenir une atmosphère réductrice peuvent générer une concentration significative en monoxyde de carbone. C'est notamment le cas pour la fusion de cuivre de qualité supérieure dans des fours à cuve en combinaison avec un procédé de coulée de formes ou avec la production de fil-machine car les produits ont besoin d'un niveau d'oxygène contrôlé pour obtenir une conductivité élevée. Par conséquent, le procédé fonctionne sous une atmosphère réductrice et la teneur des gaz en monoxyde de carbone peut être élevée. Les niveaux généralement relevés approchent les 5 000 mg/Nm³. Les systèmes de contrôle des brûleurs utilisés peuvent également limiter la formation de CO et garantir la qualité du produit. Des alarmes à CO peuvent également être intégrées dans le procédé. La production de CO typique dans un four à cuve utilisé pour la production de fil-machine ou de produits semi-finis est de 2 000 à 11 000 grammes par tonne de cuivre [tm 117, Cu Expert Group 1998]. Dans certaines

installations, une post-combustion est utilisée pour éliminer les hydrocarbures des gaz lorsque des déchets recouverts de matières organiques sont traités par le procédé. Le CO est également détruit au même moment et les émissions sont estimées à environ 45 grammes par tonne de cuivre [tm 124, DFIU Cu 1999].

Il est possible de prévoir les concentrations en CO au niveau du sol et cela peut être utilisé pour déterminer l'effet du CO sur la qualité de l'air local (il existe une proposition de VL européenne pour le CO) de manière à ce que les besoins supplémentaires en dépollution puissent être évalués localement. L'élimination du CO par combustion des gaz issus du four à cuve avec ces niveaux de CO nécessiterait davantage de combustible, ce qui entraînerait une croissance exponentielle des émissions de CO₂.

Le monoxyde de carbone est également produit lors du fonctionnement du four de traitement des laitiers et du haut fourneau et, dans certaines circonstances, peut être émis dans les effluents gazeux. Une post-combustion peut être utilisée pour éliminer le CO, ce qui donne des concentrations typiques de l'ordre de 10 à 200 mg/Nm³. Il existe au moins un exemple où de l'oxygène est injecté au sommet d'un haut fourneau au-dessus de la zone de réaction afin de fournir une zone de post-combustion dans le corps du four. Cette mesure détruit également les composés organiques tels que les dioxines. Les fours électriques utilisés pour les procédés de traitement et de réduction des laitiers sont généralement utilisés avec une post-combustion soit dans le four, soit dans une chambre de réaction spéciale.

3.2.2.3.2 Poussières et composés métalliques

Ces poussières et ces composés métalliques peuvent être émis dans la plupart des étapes du procédé. Les techniques permettant de gérer les émissions issues des étapes de manutention, de stockage, de séchage et de traitement sont abordées dans le Chapitre 2 et ces techniques doivent être appliquées pour prévenir et limiter au maximum ces émissions.

Les émissions de poussières directes et fugitives provenant des étapes de fusion, de conversion et d'affinage sont potentiellement élevées. L'importance des émissions est également élevée car ces étapes du procédé sont utilisées pour éliminer les métaux volatils tels que le zinc, le plomb et les petites quantités d'arsenic et de cadmium présents dans le cuivre. Ces métaux sont présents dans le gaz et en partie dans les poussières.

Les fonderies de cuivre primaire retiennent généralement très bien les poussières et sont isolées efficacement de manière à limiter les émissions fugitives. Des brûleurs de concentré ou des lances sont utilisés, ces dispositifs étant plus faciles à rendre étanches. Un bon entretien des fours et des conduites est réalisé fin de limiter les émissions fugitives et les gaz collectés sont traités dans des systèmes d'élimination des poussières avant le procédé de récupération du soufre.

Les fonderies de deuxième fusion sont davantage susceptibles de générer des émissions fugitives lors des cycles de chargement et de coulée. Ces fours sont dotés de grandes portes de chargement et le gauchissement et la mauvaise étanchéité de ces portes sont un facteur important. Les gaz collectés sont généralement refroidis et les poussières sont éliminées des flux de gaz au moyen de filtres électrostatiques ou de filtres à manche. Une filtration très efficace est généralement obtenue et les concentrations en poussières après dépollution sont comprises entre < 1 et 10 mg/Nm³ [tm 210, Copper Expert Group 1999 ; tm 160, Winter Cu 1999].

En raison du caractère discontinu de l'opération, les étapes de conversion et d'affinage ne peuvent généralement pas être rendues aussi étanches que l'étape de fusion. Le chargement et le transfert de la matte, du laitier et du métal sont une source potentielle considérable d'émissions fugitives. Encore plus important, l'utilisation d'une poche de coulée ou d'un système de transfert peut annuler l'efficacité des hottes de captage des fumées, notamment dans le cas de convertisseurs Peirce-Smith ou équivalents. Divers systèmes secondaires de collecte des fumées sont utilisés pour limiter ces émissions fugitives et fonctionnent de manière très efficace. Des ajouts de fondant et d'autres matériaux « par les hottes » peuvent réduire le temps de transfert. La production de matte d'une qualité supérieure réduit le nombre de transferts de poches de coulée et, par là même, le risque d'émissions de fumées. Les émissions fugitives ou non collectées sont par conséquent très importantes. Ces

problèmes dépendent du rendement et de l'efficacité des systèmes principaux et auxiliaires de collecte des fumées.

Les phases de fusion et de coulée utilisées lors de la production de fil-machine, de produits semi-finis, etc., sont également des sources potentielles de poussières et de métaux. La production d'alliages de cuivre tels que les laitons génère une quantité importante de fumées (ZnO) lors de la phase de coulée et cela nécessite une collecte efficace des fumées. La charge en poussières est généralement faible, mais la chaleur et l'énergie peuvent être récupérées si cela est possible. Un système de collecte des fumées efficace et des filtres à manches sont généralement utilisés [tm 117, Cu Expert Group 1998].

Les émissions de métaux dépendent grandement de la composition des poussières produites par les procédés. La composition varie considérablement et est influencée a) par le procédé à l'origine des poussières et b) par les matières premières en train d'être transformées. Par exemple, les poussières générées par un convertisseur de déchets sont totalement différentes de celles générées par un convertisseur de matte. Le tableau suivant indique les quantités de métaux présents dans les poussières mesurées à partir d'un certain nombre de procédés de production du cuivre.

Composé	Poussières de l'électrofiltre du four de fusion du concentré en matte	Poussière de haut-fourneau	Poussière du convertisseur de déchets	Poussière de l'électrofiltre du convertisseur de matte	Poussières du four électrique de traitement du laitier	Poussières du four à anode
Pb (%)	0,1 – 5	5 – 40	5 – 30	2 – 25	2 – 15	2 – 20
Zn (%)	0,1 – 10	20 – 60	25 – 70	5 – 70	25 – 60	5 – 40
Sn (%)	0,1 – 1	0,2 – 5	1 – 20	0,1 – 4		
Cu (%)	5 – 30	2 – 12	2 – 15	10 – 25	0,5 – 2,5	15 – 25
As (%)	0,1 – 4					0,5 – 10
Ni (%)	0,1 – 1	0,1 – 1		0,1 – 1		

Tableau 3.10 : Principaux composés des poussières provenant des procédés de production du cuivre

3.2.2.3.3 Composés de carbone organique

Ils peuvent être émis lors de la production de cuivre primaire pendant la phase de séchage en fonction des matériaux utilisés pour la transformation du minerai et du combustible utilisé pour le séchage. Pour la production de deuxième fusion, les sources les plus importantes sont les phases de traitement des déchets, de fusion et d'affinage. La phase de conversion du cuivre de deuxième fusion est également une source potentielle si des déchets contaminés par des matériaux organiques sont ajoutés dans le convertisseur et qu'une combustion complète n'est pas obtenue. C'est notamment le cas pour les émissions fugitives. Pour la production de fil-machine ou de produits semi-finis en cuivre, des COV peuvent être émis si un matériau huileux est utilisé comme charge : ces émissions peuvent être de 5 à 100 g par tonne de cuivre. Des COV peuvent également être émis lors des procédés de dégraissage ou d'extraction par solvant.

3.2.2.3.4 Dioxines

Les composés de carbone organique susceptibles d'être émis incluent les dioxines issues de la mauvaise combustion de l'huile et du plastique présent dans la charge et de la synthèse de novo si les gaz ne sont pas refroidis suffisamment rapidement. Un traitement des déchets destiné à éliminer la contamination organique peut être réalisé, mais généralement une post-combustion suivie d'un refroidissement rapide est utilisée pour traiter les gaz produits. Lorsqu'il est impossible de traiter les gaz émis par les fours dans une chambre de post-combustion, ils peuvent être oxydés par enrichissement à l'oxygène dans la zone située au-dessus de la zone de fusion. Il est également possible d'identifier la contamination organique des matières premières de deuxième fusion de

manière à ce que la combinaison de four et de système de dépollution la plus appropriée puisse être utilisée afin de prévenir les émissions de fumées, de vapeurs et de dioxines associées.

Le Groupe de Travail Technique a signalé que dans le cas de la fusion et de la conversion du cuivre primaire, les températures de fonctionnement élevées détruisent les composés organiques et que la présence de dioxyde de soufre inhibe la synthèse de novo des dioxines. Les déchets de fusion contaminés par des matières organiques sont également une source potentielle de dioxines dans le secteur des produits semi-finis.

Le Chapitre 2 décrit certains des facteurs qui influencent les émissions de dioxines. Les techniques utilisées pour éliminer les dioxines dans ce secteur incluent la post-combustion, la manipulation et le refroidissement contrôlés des gaz et une élimination efficace des poussières ; l'absorption du charbon actif est également utilisée.

3.2.2.3.5 Dioxyde de soufre

Les principales sources de dioxyde de soufre sont les phases de grillage, de fusion et de conversion en production de cuivre primaire utilisant des concentrés sulfurés [tm 24, DFIU 1991]. Des émissions fugitives sont prévisibles, mais elles peuvent être collectées de plusieurs manières [tm 124, DFIU Cu 1999]. Du dioxyde de soufre peut également se dégager lors de la phase de séchage du concentré (provenant principalement du combustible utilisé dans le brûleur) et lors des phases d'affinage primaire lorsque le blister a une teneur en soufre dissout comprise entre 0,03 et 0,1 %. La concentration dans le gaz est habituellement très faible et un simple laveur de gaz est généralement utilisé, si nécessaire.

Si un grillage partiel et une fusion des produits calcinés pour matte ne sont pas appliqués dans des unités séparées en raison de l'utilisation d'une charge spéciale, le grillage des concentrés de cuivre est réalisé simultanément à la fusion. L'utilisation de fours étanches pour la fusion permet une collecte efficace du dioxyde de soufre. Toutes les fonderies de l'UE ont recours à un enrichissement à l'oxygène qui génère une concentration élevée en dioxyde de soufre. Par conséquent, cela permet de réduire au maximum les volumes des effluents gazeux et de réduire la taille du système de manipulation des gaz, y compris l'unité de production d'acide sulfurique. Des niveaux très élevés d'enrichissement en oxygène peuvent augmenter la concentration en trioxyde de soufre dans les gaz passant dans une unité de fabrication d'acide. Cette quantité accrue de trioxyde de soufre dans le gaz généré par le four est absorbée dans les laveurs et augmente la quantité d'acide faible à traiter, destiné à d'autres usages ou éliminé. Des unités de production d'acide sulfurique par contact avec quatre ou cinq étages sont utilisées pour convertir les gaz. Dans certains cas, des installations par contact à simple absorption sont utilisées si la teneur en dioxyde de soufre est faible (< 6 %), sinon des installations par contact à double absorption sont utilisées [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Si nécessaire, du dioxyde de soufre liquide peut être produit à partir d'une partie du dioxyde de soufre contenu dans le gaz.

La phase de conversion de la matte génère également une concentration importante en dioxyde de soufre. Deux problèmes potentiels se posent lors de l'utilisation de convertisseurs chargés en discontinu tels que les convertisseurs Peirce-Smith ou équivalent. Premièrement, la collecte des gaz n'est pas totalement efficace et on peut formuler les mêmes remarques que celles formulées pour les poussières. Deuxièmement, la concentration du dioxyde de soufre émis varie considérablement en fonction de la phase de conversion et peut causer des problèmes avec les systèmes d'élimination du dioxyde de soufre à moins qu'ils ne soient spécifiquement conçus pour tenir compte de cette variation. Ces gaz sont mélangés avec les gaz stables et plus concentrés produits par la fonderie primaire afin de maintenir un fonctionnement auto thermal de l'usine de fabrication d'acide sulfurique. L'utilisation de plusieurs convertisseurs dans une opération séquentielle combinant les effluents gazeux peut également atténuer cet effet.

Les procédés en continu tels que le procédé Mitsubishi et le procédé de fusion flash / conversion flash Kennecott - Outokumpu maintiennent une concentration élevée et constante en dioxyde de soufre et ne nécessitent pas de transfert en poches de coulée [tm 67, Kennecott 1997 ; tm 73, Mitsubishi 1993]. Les

volumes de gaz produits sont par conséquent moins importants. Cela signifie que la concentration en dioxyde de soufre est plus élevée dans les gaz émis, mais que la masse est plus faible, au moins lors de la manipulation, du traitement et du refroidissement des gaz. Dans l'unité de contact, le ratio SO_2/O_2 doit être ajusté et la concentration en SO_2 doit être diluée jusqu'à la concentration maximale admissible.

Une fois la récupération de chaleur et le traitement des gaz par filtres électrostatiques effectués, le dioxyde de soufre présent dans les gaz issus des phases de fusion est transformé en trioxyde de soufre (SO_3). Les usines de fabrication d'acide sulfurique de l'industrie européenne du cuivre présentent une efficacité de conversion comprise entre 99,5 et 99,8 % (hors démarrage, etc.) [tm 92, Copper Expert group 1998]. Une très petite quantité de SO_3 n'est pas absorbée et est émise avec le SO_2 résiduel [tm 124, DFIU Cu 1999]. Lors des phases de démarrage et d'arrêt, il peut exister des moments où des gaz faiblement concentrés sont émis. Ces événements doivent être identifiés pour chaque installation, de nombreuses sociétés ont fait des progrès significatifs en matière de contrôle du procédé et, par là même, de réduction de ces émissions. La hauteur de la cheminée utilisée pour les gaz de l'unité de production d'acide tient généralement compte de ces facteurs afin de limiter l'impact local.

Du dioxyde de soufre peut également être présent dans les gaz produits lors des phases de fusion de deuxième fusion en raison de la teneur en soufre du combustible ou des matières premières. Dans certains cas, des laveurs sont utilisés pour éliminer le SO_2 et dans un cas les gaz provenant d'un four électrique (et d'un convertisseur Cu/Pb) sont déviés vers une usine de fabrication d'acide sulfurique associée à une fonderie de cuivre primaire lorsque certaines matières premières sont présentes.

3.2.2.3.6 Oxydes d'azote

Les phases de production du cuivre impliquent généralement des températures élevées, mais sont également associées à l'utilisation d'oxygène. Cela réduit la pression partielle de l'azote dans la flamme et réduit la formation d'oxyde d'azote pourvu qu'il n'y ait pas de grandes quantités d'azote dans les zones très chaudes. Les niveaux typiques d'émissions d'oxyde d'azote enregistrés lors de la production de cuivre de deuxième fusion sont compris dans la fourchette 50 à 500 mg/Nm³, selon le four et le type de fonctionnement. S'agissant des NO_x, l'utilisation de procédés très efficaces (Contimelt, par ex.) nécessite qu'un équilibre soit instauré au niveau local entre la consommation énergétique et la valeur atteinte.

Les oxydes d'azote issus des procédés primaires sont principalement absorbés par l'acide sulfurique produit. Par conséquent, les oxydes d'azote ne constituent pas un problème majeur pour l'environnement au niveau de l'installation.

3.2.2.3.7 Récapitulatif concernant les émissions dans l'air

Type de Procédé	Poussières (g/t de métal)	Dioxyde de soufre (g/t de métal)	Cuivre (g/t de métal)	Plomb (g/t de métal)	Arsenic (g/t de métal)
Cuivre primaire	160 – 1 000	6 600 – 16 000	30 – 250	7 – 35	3 – 20
Cuivre de deuxième fusion	100 – 1 000	500 – 3 000	8 – 100	10 – 60	0,5 – 5
Atelier de fabrication de produits semi-finis			1 – 3,5	0,1 – 1	0,01 – 0,2
Production de fil-machine	20 – 500	10 – 50	12 – 260		

Tableau 3.11 : Émissions spécifiques dans l'air provenant de certains procédés de première et de deuxième fusion

[tm 124, DFIU Cu 1999 ; UK Chemical Release Inventory 1998 ; tm 160 Winter Cu 1999]

Unité de process		Poussières (en mg/Nm ³)	CO (en mg/Nm ³)	Carbone organique total (en mg/Nm ³)
Atelier de fusion	Four électrique	< 10		< 20
	Four tournant	< 10		< 50
	Haut-fourneau (ASARCO)	< 10	< 100*	< 20
Laminoir				< 50
Fraisage		< 10		
Note. * Avec post-combustion (post-combustion dépendant du type de charge (contenu en huile/composé organique). Émissions captées uniquement.				

Tableau 3.12 : Niveaux d'émissions pouvant être atteints à partir d'un procédé de fabrication de produits semi-finis

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Unité de process		Poussières (en g/t)	CO (en g/t)	Carbone organique total (en g/t)	PCDD/F (en µg/t (I-TEQ))
Atelier de fusion	Four électrique	< 70	-	< 80	< 5
	Four tournant	< 50	-	< 11	< 10
	Haut-fourneau (ASARCO)	< 12			< 10
	Sans post-combustion		< 10 000		
	Avec post-combustion		< 45	< 9	
Laminoir		-		< 100	
Fraisage		< 20			
Note. * Avec post-combustion (post-combustion dépendant du type de charge (contenu en huile/composé organique). Émissions captées uniquement.					

Tableau 3.13 : Émissions spécifiques provenant d'un procédé de fabrication de produits semi-finis

[tm 124, DFIU Cu 1999]

3.2.2.4 Émissions dans l'eau

Les procédés pyrométallurgiques utilisent de grandes quantités d'eau de refroidissement (les systèmes de refroidissement sont abordés dans le Chapitre 2 et dans un BREF horizontal séparé consacré aux systèmes de refroidissement). D'autres sources d'eaux de procédé sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Des solides en suspension, des composés métalliques et des huiles peuvent être rejetés dans l'eau à partir de ces sources. Toutes les eaux usées sont traitées afin d'éliminer les métaux et les solides qui y sont dissous. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés [tm 210, Copper Expert Group 1999]. Les sources potentielles et l'importance des émissions potentielles dans l'eau sont indiquées dans le tableau suivant et sont traitées plus loin dans la présente section.

Source d'émission	Solides en suspension	Composés métalliques	Huiles
Drainage de surface	***	**	***
Eau de refroidissement pour refroidissement direct	***	***	•
Eau de refroidissement pour refroidissement indirect	•	•	
Eau de granulation	***	**	
Décapage	**	***	***
Lixiviat (si circuit non fermé)	***	***	•
Salle de cuves (si circuit non fermé)	**	***	***
Systèmes d'épuration	***	***	
Note. *** Le plus important ... • Le moins important Les circuits de lixiviation ouverts et les salles de cuves en circuit ouvert ne sont pas utilisés au sein de l'UE.			

Tableau 3.14 : Importance des émissions potentielles dans l'eau provenant des procédés de production du cuivre

3.2.2.4.1 Solides et composés métalliques en suspension

Ils peuvent être émis lors des différentes phases du procédé, la source la plus importante étant les eaux usées et les eaux de rinçage issues des opérations de décapage. Les techniques utilisées pour gérer les émissions provenant des zones de manutention et de stockage des matières premières sont abordées dans le Chapitre 2 et l'application de ces techniques permet de prévenir et de limiter ces émissions. L'eau de surface peut provenir soit des eaux de pluie, soit du mouillage des matériaux stockés afin de prévenir la formation de poussières.

Les sources potentielles de solides et de composés métalliques en suspension sont les systèmes de refroidissement, de granulation et de lixiviation. En règle générale, ces systèmes sont soit étanches, auquel cas l'eau est renvoyée dans le circuit, soit sans contact.

Des eaux de lavage, de l'électrolyte usagé et des effluents de procédé sont également produits dans les salles de cuves, les lignes de décapage et les laveurs. Ces effluents contiennent des quantités significatives de composés métalliques en solution et sont traités avec les solutions évacuées des systèmes de refroidissement et de granulation étanches avant d'être rejetés dans l'eau [tm 28, WRC 1993]. Une fuite du système peut se produire et des dispositifs de surveillance sont nécessaires pour les canalisations et les cuves de stockage, et notamment pour les conduites situées à l'extérieur de l'usine et, dans les cas où ils se trouvent dans des zones dénuées de système de collecte. Les procédés de traitement des eaux usées sont décrits dans le Chapitre 2 et la méthode utilisée dépend des agents contaminants présents, de la destination de l'eau traitée et de la qualité de l'environnement local.

	Débit (m³/a)	Principaux composés					
		Cu	Pb	As	Ni	Cd	Zn
Eau de procédé	72 000	0,01 – 0,2	0,001 – 0,04	0,01 – 0,1	0,004 – 0,15	0,0001 – 0,1	0,01 – 0,2
Eaux de ruissellement	322 000	0,01 – 0,4	0,005 – 0,2	0,003 – 0,07	0,002 – 0,4	0,0002 – 0,1	0,03 – 0,4
Eau de refroidissement direct	11 300 000	0,01 – 0,25	0,001 – 0,1	0,001 – 0,1	0,002 – 0,06	0,0001 – 0,003	0,02 – 0,5
Eau de refroidissement (total)	82 000 000						

Note : Ce tableau fait référence à un complexe de raffinerie/fonderie combiné produisant du cuivre primaire/secondaire situé le long d'une rivière proche de la mer (production : 370 000 tonnes de cathode de cuivre chaque année).

Tableau 3.15 : Exemples de teneur en métaux de diverses eaux usées après traitement

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Substance	Valeur (kg/a)
Cu	11
Ni	3
Zn	25
Pb	1
Cr	1
As	0,01
Cd	0,01
Hg	0,01
Sn	1
Note. Effluents rejetés : 35 000 m ³ /a.	

Tableau 3.16 : Charges annuelles rejetées dans l'eau par une usine de fabrication de produits semi-finis en cuivre

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Tous les procédés génèrent des boues qui sont généralement envoyées en décharge contrôlée. Dans certains cas, elles sont renvoyées dans la fonderie afin de récupérer les métaux qu'elles contiennent.

3.2.2.4.2 Huiles

Elles peuvent être présentes dans les matières premières secondaires et peuvent être nettoyées des zones de stockage. Les techniques utilisées pour le stockage sont traitées dans la section 2. Des cires et des huiles sont utilisées dans les procédés de revêtement et de tirage associés à la production de barres et autres formes et leur présence est prise en compte afin d'empêcher toute contamination de l'eau.

3.2.2.5 Sous-produits, résidus et déchets issus des procédés

Certains produits intermédiaires générés lors de la production du cuivre peuvent figurer sur la Liste des Déchets Dangereux (décision du Conseil n° 94/904/CEE) indiquée dans la section 2.10.1. Toutefois, la plupart de ces matériaux contiennent des quantités récupérables de cuivre et d'autres métaux non-ferreux et sont, par conséquent, utilisés comme matières premières en tant que tels. À titre d'exemple, le laitier provenant de la production d'étain à partir de cassitérite est la principale source de tantale et de niobium. Des poussières émises provenant de toutes les sources peuvent également être réutilisées dans le procédé de fusion, afin de prévenir la formation de poussières lors de la manutention elles doivent être manipulées avec précaution, généralement dans des systèmes spécialement conçus ou déjà prétraitées en vue des besoins du procédé ultérieur. Certains garnissages de four peuvent également être réutilisés comme masses de trous de coulée ou dans le procédé et peuvent être intégrées dans le laitier. Dans d'autres cas, les garnissages sont mis en décharge.

Source du procédé	Produits intermédiaires, sous-produits, résidus	Utilisation finale
Systèmes de dépollution	Poussières sous filtre Composés de mercure Catalyseurs et acides usagés Boues d'acide sulfurique Acides faibles	Matières premières pour Cu (renvoyées dans fonderie), Pb, Zn et autres métaux. Matières premières pour Hg. Industrie chimique Neutralisation Autres utilisations (lixiviation, décomposition pour SO ₂ , par exemple)
Fonderie	Laitier Garnissages de four	Vers le four à laitier ou tout autre dispositif de séparation – recyclage interne. Récupérés ou mis en décharge.
Convertisseur	Laitier	Vers la fonderie – recyclage interne
Four à laitier	Laitier	Abrasifs, matériaux de construction
Four d'affinage (à anode)	Laitier	Vers la fonderie – recyclage interne
Hall d'électrolyse	Évacuation d'électrolyte Restes d'anodes Boue anodique	Sels de Ni, récupération de Cu, récupération d'acide ou autres utilisations. Recyclage interne : convertisseur (refroidissement) ou four à anode. Récupération des métaux précieux.
Fusion	Résidus d'écémage et laitier	Matières premières pour la récupération des métaux
Général	Huiles	Récupération des huiles
Hydrométallurgie	Électrolyte usagé	Lixiviation
Fabrication de produits semi-finis	Solutions de décapage acides et solutions de rinçage	Mises en décharge en tant que déchet si la teneur en métaux non-ferreux est faible ou vendues afin de récupérer les métaux qu'elles contiennent.
Production de barres	Solutions de décapage acides (le cas échéant)	Récupération dans une cuve d'électrolyse séparée

Tableau 3.17 : Produits intermédiaires, sous-produits et résidus issus de la production du cuivre

Les déchets destinés à être mis en décharge sont limités au maximum et sont essentiellement constitués de boues acides provenant des unités de production d'acide sulfurique qui sont traités et envoyées en décharge ou de garnissages de four dont certains ne peuvent pas être récupérés par le procédé. Dans certains cas, des déchets provenant du traitement du laitier de la fonderie ou du convertisseur par flottation sont produits. Ces déchets sont mis en décharge sur le site ou sur le site minier si ce dernier est situé à proximité. D'autres déchets sont considérés soit comme des ordures ménagères, soit comme des déchets de démolition.

Le tableau ci-dessus indique les utilisations potentielles des résidus de procédé. Un grand nombre de ces résidus sont utilisés comme matières premières pour la production d'autres métaux ou comme matériaux recyclés dans le procédé de production du cuivre [tm 210, Copper Expert Group 1999]. Les tableaux suivants donnent des exemples des quantités de résidus, de produits intermédiaires et de sous-produits générés par les procédés de première et de deuxième fusion.

Unité de process	Sous-produit Résidu	Quantité (t/an)	Utilisation/Option de traitement
Installation primaire : production annuelle de cathode – cuivre primaire 220 000 t/an			
Four de fusion flash	Poussières	100 000	Utilisation interne dans le four de fusion flash
	Laitier	400 000	Traitement supplémentaire dans le four électrique
Four électrique	Poussières	400	Utilisation externe pour la production de Zn/Pb
	Laitier	400 000	Utilisation externe comme matériau de construction
Convertisseur de cuivre	Poussières	4 000	Recyclage interne dans le four de fusion flash ou dans le four électrique (installation de deuxième fusion)
	Laitier	150 000	Utilisation interne dans le four de fusion flash
Four à anode	Poussières	200	Utilisation interne dans le four de fusion flash
	Laitier	20 000	Utilisation interne dans le convertisseur de cuivre
Unité de production d'acide sulfurique	Acide sulfurique	656 000	Sous-produit destiné à la vente
Installation de deuxième fusion : production annuelle de cathode – cuivre de deuxième fusion : 150 000 t/an			
Four électrique	Poussières	10 000	Sous-produit destiné à la vente afin d'en récupérer le Zn
	Laitier	40 000	Utilisation externe comme matériau de construction
Convertisseur	Poussières	400	Utilisation interne dans le four électrique
	Laitier	10 000	Utilisation interne dans le four électrique
Procédé Contimelt	Poussières	1 000	Utilisation interne dans le four de fusion flash ou dans le four électrique
	Laitier	2 000	Utilisation interne dans le convertisseur de cuivre
Convertisseur de déchets/ installation TLA	Poussières	1 000	Traitement supplémentaire dans l'installation TLA
	Laitier	2 000	Utilisation interne dans le four électrique
Autres :			
Électrolyse	Boues anodiques (poids humide)	3 000	Utilisation interne dans l'usine chimique pour la récupération de métaux précieux, Se, Te, Pb
	Solution finale	35 000 m ³	Utilisation interne dans l'usine chimique pour la production de sulfate de nickel, de As ₂ O ₃ et de H ₂ SO ₄
Usine de traitement des eaux usées (de procédé)	Boues (poids humide)	1 500	Mise en décharge en tant que matière dangereuse
Général	Ordures ménagères	400	

Tableau 3.18 : Exemples de quantités de résidus produites par une installation complexe de production de première et de deuxième fusion

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Unité de process	Sous-produit, résidu	Quantité (t/a)	Utilisation/options de traitement
Haut fourneau	Laitier	30 000 – 35 000	Vendu comme matériau de construction
	Oxyde provenant de la chambre de post-combustion, de la chaudière et du refroidisseur	700 – 800	Utilisation interne dans le haut fourneau
	Oxyde de filtre	1 000 – 1 300	Utilisation externe pour récupérer le Zn, le Pb, etc.
Convertisseurs	Laitier	17 000 – 19 000	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Oxyde provenant de la chambre de post-combustion	250 – 300	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Oxyde provenant du refroidisseur	100	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Résidus	300	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Oxyde de filtre	3 500 – 3 700	Utilisation externe pour récupérer le Zn, le Pb, etc.
Four à anode	Résidus de cuivre anodique	7 000 – 8 000	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Oxyde de filtre	150	Utilisation interne dans le haut-fourneau
	Résidus provenant du four	200	Utilisation interne dans le haut-fourneau
Électrolyse	Boue anodique	360	Utilisation externe
	Sulfate de nickel	700	Utilisation externe
Général	Ordures ménagères	n.d.	
Note : production annuelle de 60 000 t/a de cathodes			

Tableau 3.19 : Exemples de quantités de résidus produites par une installation de production de deuxième fusion

[tm 124, DFIU Cu 1999]

Les laitiers contiennent des quantités variables de cuivre et nombre de ces laitiers sont réutilisés ou traités afin de récupérer le métal qu'ils contiennent. Le traitement du laitier est souvent réalisé au moyen d'un procédé thermique afin de produire un laitier inerte.

Composé	Four de fusion flash	Convertisseur Peirce Smith	Laitier combiné après traitement dans un four électrique
[poids - %]			
Cuivre	1 – 2,5	3 – 5	0,3 – 0,8
Fer (total)	38 – 45	40 – 45	40 – 43
Silice	30 – 33	25	28 – 32
Magnétite	4 – 18	25	< 2

Tableau 3.20: Composition de certains laitiers de fusion de cuivre avant traitement du laitier

[tm 124, DFIU Cu 1999]

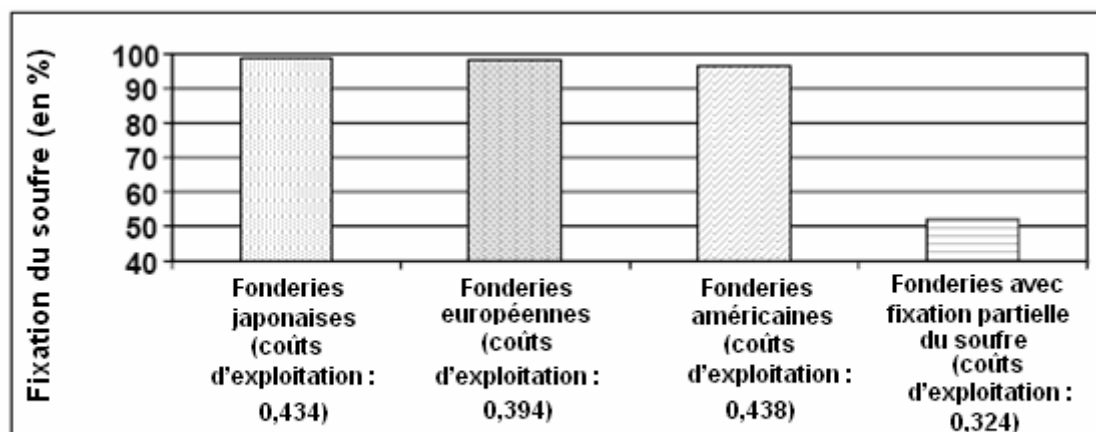
Une grande partie des laitiers produits par les procédés de traitement des laitiers contient de très faibles niveaux de métaux lixiviables et sont stables. Ces laitiers sont fréquemment vendus à des entreprises du secteur de la construction et des abrasifs car ils possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, parfois supérieures à celles de leurs homologues naturels. Des huiles provenant de diverses sources au cours du procédé peuvent être récupérées.

3.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et les procédés associés.

Le contrôle des paramètres de fonctionnement des fours, la prévention des émissions fugitives provenant des fours et les procédés de coulée et de coulée en poche jouent également un rôle majeur. Certaines techniques utilisées dans d'autres secteurs, notamment celles relatives aux systèmes de récupération du soufre, sont également applicables aux métaux non-ferreux.

Les techniques appropriées sur un site donné sont fortement influencées par les matières premières à traiter par le procédé : ainsi, le type et la variabilité du concentré ou des matières premières secondaires peuvent être déterminants pour le choix du procédé. Au niveau mondial, certaines opérations possèdent une source dédiée et unique de matières premières, mais la majorité des usines européennes achètent du concentré sur le marché et doivent faire preuve de flexibilité dans la transformation de toute une gamme de matières premières. De la même manière, les standards auxquels obéissent les systèmes de collecte et de dépollution utilisés dans le monde par l'industrie reflète des normes de qualité environnementale locales, régionales ou transfrontalières et une comparaison directe des performances environnementales des combinaisons de procédés s'avère par conséquent difficile. Il est toutefois possible de juger la manière dont un procédé en particulier peut se comporter avec un équipement de dépollution moderne approprié [tm210, Copper Expert Group 1999].



Remarque. Fixation du soufre : - Japon : 98,6 % - Europe 98,3 % - Amérique : 96,8 % - Autres : 52 % (coûts basés sur la parité 1 € = 1,06 \$ (16/06/1999)).

Tableau 3.21 : Fixation moyenne du soufre comparée aux coûts d'exploitation en €/kg atteints par les fonderies dans le monde

Source - Brook Hunt 1998 CRU Copper Studies 1997

En prenant le degré de fixation du soufre comme exemple, le tableau ci-dessus illustre les effets sur les performances environnementales et les résultats des installations européennes. Ce tableau montre qu'une bonne fixation du soufre peut être atteinte au sein de l'Union européenne tout en respectant les limites économiques fixées. Cela est démontré en termes de coûts d'exploitation directs pour les

usines possédant un procédé moderne comparable, mais avec des variations en ce qui concerne la dépollution.

3.3.1 Procédés de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux

3.3.1.1 Matières premières primaires

Les matières premières sont des concentrés, des fondants et du combustible. Des aspects importants sont la prévention des fuites de poussières et de matériau mouillé, la collecte et le traitement des poussières et des liquides et le contrôle des paramètres d'intrants et d'exploitation des procédés de manutention et de chargement.

Les problèmes spécifiques rencontrés par ce groupe sont les suivants :

- La nature potentiellement pulvérulente de certains concentrés et de certains fondants (chaux, par ex.) implique que des techniques telles que des systèmes de stockage, de manutention et de traitement fermés sont des techniques à prendre en compte dans ce cas. La poussière générée par certaines opérations de concassage de laitier implique qu'un système de collecte et de dépollution devrait être inclus dans ce procédé. De même, l'eau de granulation du laitier peut nécessiter une décantation ou un autre traitement avant d'être rejetée ;
- Les concentrés sont mélangés à des fondants afin de produire une charge assez constante. Par conséquent, la pratique généralisée qui consiste à procéder à des échantillonnages et à des analyses afin de caractériser les concentrés et à stocker chaque concentré séparément de manière à ce qu'un mélange optimal puisse être préparé en vue de la fusion est une technique à prendre en compte ;
- Les mélanges de charge préparés dans les parcs d'homogénéisation ou dans les systèmes de dosage utilisant des dispositifs de pesée tels que les balances à courroie sont des techniques à prendre en compte. Ils forment un mélange sandwich sur la courroie. Le mélange final et l'homogénéisation sont réalisés dans les systèmes de convoyage et de séchage. Des convoyeurs fermés ou des systèmes de transfert pneumatiques sont utilisés. Des sécheurs rotatifs à gaz chaud, des sécheurs sur lit fluidisé, des sécheurs flash ou des sécheurs à vapeur, etc., peuvent être utilisés. Les sécheurs à vapeur utilisent la chaleur résiduelle provenant des autres phases du procédé dans la mesure où l'équilibre thermique le permet. Le sécheur et la phase de dépoussiérage associée dépendent par conséquent de conditions spécifiques au site telles que la fiabilité de l'approvisionnement en vapeur. Les filtres à manches ou en céramique permettent d'éliminer les poussières plus efficacement que les filtres électrostatiques ;
- Dans certains cas, on constate que le matériau sec a une température d'inflammation comprise entre 300 et 400 °C, mais ce facteur peut être traité de différentes manières. Par exemple, la teneur en oxygène des gaz présents dans un sécheur à air chaud est faible et la température de fonctionnement est contrôlée à un niveau maximal admissible, la plupart du temps par mélange avec de l'air froid. De l'azote peut également être utilisé. L'inflammation spontanée ne constitue généralement pas un problème dans ce cas. De même, des sécheurs à vapeur peuvent maintenir une température basse dans le concentré et un débit d'air faible : on obtient le même effet. Certaines techniques sont également utilisées pour prévenir l'inflammation spontanée. La détection de la chaleur ou des étincelles permet d'identifier les zones sensibles et ces dispositifs peuvent être utilisés pour déclencher un refroidissement rapide de l'azote. Toutes ces techniques sont des techniques à envisager en fonction du site ;
- Le stockage de l'acide produit lors du procédé dans des cuves à double paroi ou dans des cuves placées derrière des enceintes résistantes aux produits chimiques sont des techniques à envisager. Le traitement des boues acides provenant de l'unité de production d'acide sulfurique et des acides faibles provenant des systèmes d'épuration dépend des exigences locales de traitement ou de mise en décharge, à moins qu'il existe un débouché local permettant au matériau d'être réutilisé. Les

boues anodiques et autres résidus contenant des métaux destinés à être récupérés en dehors du site doivent être stockés dans des fûts ou de toute autre manière appropriée pour le matériau.

EXEMPLE 3.01 SYSTÈME D'ÉCHANTILLONNAGE ET DE RÉCEPTION DE MATIÈRES PREMIÈRES

Description : Système de réception et d'échantillonnage du concentré. Zone de coulée par véhicule étanche, système de transfert étanche et échantillonnage informatisé. Zones de stockage et d'homogénéisation fermées, convoyeurs fermés.

Principaux bénéfices environnementaux : - Prévention des poussières fugitives. Charge définie pour le procédé.

Données opérationnelles : - Non disponibles, mais des indications visuelles permettent de dire que ces systèmes atteignent un standard élevé.

Effets croisés : - Effet positif - Réduction de la consommation d'énergie, réduction des principales émissions.

Aspects économiques : - Aucune donnée disponible, mais on peut conclure au vu de la pratique courante que ces techniques sont économiquement viables. Augmentation du rendement de la production.

Applicabilité : - La plupart des procédés de première fusion.

Exploitations de référence : - Actuellement utilisé dans des installations en Espagne, en Belgique et en Allemagne.

Documents de référence : - [tm 106, Farrell 1998]

3.3.1.2 Matières premières secondaires

Il existe une grande diversité de matières premières secondaires utilisées pour la production de deuxième fusion : elles vont de poussières fines à de grosses pièces uniques. La teneur en cuivre varie pour chaque type de matériau tout comme la teneur en autres métaux et contaminants. La taille et la teneur en cuivre (faible, moyenne et élevée) peuvent être utilisées pour classer les matériaux. Les techniques utilisées pour le stockage, la manutention et le prétraitement varieront en fonction de la taille du matériau et de l'ampleur de l'éventuelle contamination. Ces facteurs varient d'un site à l'autre et les techniques traitées dans le Chapitre 2 sont des techniques à prendre en compte. Les problèmes spécifiques à un site donné applicables à ce groupe sont :

- . Stockage des poussières fines dans des bâtiments fermés ou dans des récipients étanches.
- . Stockage des matières premières secondaires contenant des composés solubles dans l'eau à l'abri.
- . Stockage des matériaux non pulvérulents et non solubles sous forme de tas à l'air libre et des grosses pièces individuellement à l'air libre.
- Les grosses pièces et notamment les morceaux de laitier, de métal (blister, etc.) peuvent endommager les surfaces en béton en provoquant des fissures cachées. La technique utilisée sera choisie au cas par cas.

Des phases de prétraitement sont souvent utilisées pour éliminer les composés organiques tels que les restes de gaine de câble et de cartes de circuit imprimés et pour isoler d'autres métaux (étain ou plomb, par exemple).

- L'utilisation de techniques de fraisage et de meulage associée à une bonne extraction et à une bonne dépollution de la poussière sont des techniques à prendre en compte. La poussière fine

produite peut être traitée afin de récupérer les métaux précieux. Des techniques de séparation pneumatiques ou autres sont utilisées.

- Les techniques cryogéniques sont également des techniques à prendre en compte pour rendre les gaines de câbles friables et les séparer plus facilement.
- Les procédés d'élimination des garnissages et de déshuilage thermiques sont également des techniques à prendre en compte et comporteront une phase de post-combustion destinée à détruire toute matière organique présente dans les effluents gazeux.
- Les poussières fines sont stockées et manipulées d'une manière permettant de prévenir l'émission de poussières. Elles sont souvent mélangées et agglomérées afin de fournir une charge homogène pour le four.

Matière première	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Charbon ou coke	Baies couvertes, silos	Convoyeurs couverts si non pulvérulent. Pneumatique.		
Combustible et autres huiles	Cuves ou fûts dans des endroits dotés d'un dispositif de confinement	Pipeline sécurisé ou système manuel		
Fondants, s'ils génèrent des poussières	À l'air libre sur béton ou sur une autre surface similaire, sur le sol. Silo fermé si nécessaire.	Convoyeurs fermés équipés d'un dispositif de collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange avec des concentrés ou d'autres matériaux.	
Concentrés	Fermé sauf s'ils ne génèrent pas de poussières.	Systèmes fermés équipés d'un dispositif de collecte des poussières. Pneumatique	Mélange à l'aide des convoyeurs. Séchage.	
Produits en cuivre – cathodes, fil-machine, billettes et galettes de cuivre	À l'air libre sur une surface bétonnée ou stockage fermé.			
Poussières fines	Fermé	Systèmes fermés équipés d'un dispositif de collecte des poussières. Pneumatique	Mélange Agglomération	
Poussières grossières (matière première ou granulés de laitier)	Baies couvertes	Chargeur mécanique	Déshuilage, si nécessaire	Collecte des huiles, si nécessaire
Morceaux (matière première ou laitier)	Ouvert	Chargeur mécanique		Collecte des huiles, si nécessaire
Éléments entiers	À l'air libre ou baies couvertes	Chargeur mécanique		Collecte des huiles, si nécessaire
Copeaux	Stockage couvert	Bennes de chargement	Séchage ou déshuilage des copeaux	Collecte des huiles, si nécessaire
Câbles	À l'air libre	Chargeur mécanique	Retrait des gaines isolantes	
Circuits imprimés	Baies couvertes	Chargeur mécanique	Broyage + séparation par densité	La matière plastique présente dans ce matériau peut fournir de la chaleur
Résidus de procédé à récupérer	À l'air libre, couvert ou fermé selon la formation de poussières.	En fonction des conditions		Système d'évacuation approprié
Déchets à mettre en décharge (garnissages de four, par exemple)	À l'air libre, couvert ou baies fermées ou conteneur hermétique (fûts) Selon le matériau.	En fonction des conditions		Système d'évacuation approprié

Tableau 3.22 : Techniques de stockage, de manutention et de prétraitement à prendre en compte pour le cuivre

3.3.2 Procédés de première fusion

Les procédés de fusion du cuivre utilisés au sein de l'UE sont [tm 92, Copper Expert Group 1998] :

- Four de fusion flash Outokumpu associé à un enrichissement en oxygène afin de fondre le concentré de cuivre normal pour matte. Conversion de la matte dans des convertisseurs Peirce-Smith afin de produire un cuivre blister. Traitement des laitiers dans un four électrique ou par flottation.
- Grillage partiel des concentrés dans un four de grillage sur lit fluidisé, dans un four électrique de fusion pour matte. Conversion de la matte en cuivre blister dans des convertisseurs Peirce-Smith. Traitement des laitiers par vaporisation. Les matières premières traitées par le procédé contiennent du zinc et une certaine quantité de plomb en plus du cuivre.
- Fusion et conversion en cuivre blister du plomb/cuivre primaire et secondaire et d'une petite quantité de matières premières contenant du zinc dans un four ISA Smelt. Production de plomb par traitement des laitiers dans un haut fourneau.

Toutes ces techniques sont des techniques à prendre en compte.

Le four de fusion éclair Outokumpu produit une matte de grande qualité qui facilite et simplifie le procédé de conversion.

Dans certains cas, le four peut produire du cuivre blister directement sans phase de conversion. L'utilisation du four de fusion éclair Outokumpu de cette manière est caractérisée par une production de cuivre blister lors d'une seule phase de fusion utilisant des concentrés spécifiques à faible teneur en fer ou des concentrés de très haute qualité [tm 137, Cu Expert Group 1998]. Par exemple, ce procédé est utilisé en Pologne pour la production directe de blister à partir de concentré à faible teneur en fer.

Le four de fusion flash Outokumpu comporte un dispositif de récupération de chaleur sous forme de vapeur et d'électricité ainsi qu'un dispositif de collecte et de récupération du dioxyde de soufre sous forme d'acide sulfurique. La durée de vie du garnissage du four est d'environ 5 à 10 ans (cela dépend de plusieurs facteurs, comme la taille du four, la cadence de production, les paramètres de fonctionnement utilisés, etc.).

Outre les exemples ci-dessus, plusieurs autres fours sont utilisés pour la phase de fusion dans le monde [tm 137, Copper Expert Group 1998] et plusieurs de ceux-ci peuvent également être pris en compte. L'utilisation du four à réverbère pour les concentrés de cuivre primaire n'est pas considérée comme une technique à prendre en compte.

Il existe une distinction entre ces procédés, car deux d'entre eux, les procédés Mitsubishi et Kennecott/Outokumpu, combinent les phases de fusion et de conversion. Le procédé Mitsubishi utilise trois fours interconnectés avec écoulement du matériau en fusion entre les fours par gravité. Le procédé Kennecott/Outokumpu utilise un procédé de granulation et de broyage de la matte entre le four de fusion et le four de conversion de manière à ce que les opérations unitaires soient séparés.

Tous les fours mentionnés ont fait l'objet d'une description précédemment et figurent dans la liste du tableau ci-dessous qui résume les avantages et les inconvénients des différents procédés.

Four	Capacité appliquée X 1 000 t/a	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
<i>Procédé de fusion</i>					
Fusion flash Outokumpu	Env. 150 à 370 (généralement 200 à 300)	Four hermétique	Capacité de fusion élevée. Matte de grande qualité. Longue durée de vie du garnissage de four.	Investissement comparativement plus élevé mais coûts d'exploitation inférieurs.	Procédé très bien connu.
Four électrique (avec grillage partiel)	~ 40 à 220	Four hermétique	Première et deuxième fusion. Compact.	Procédé en deux étapes.	
Four ISA Smelt	~ 170 à 230	Four équipé de hottes	Première et deuxième fusion. Capacité de fusion élevée. Variété des combustibles.	Nécessite un décanteur pour séparer la matte du laitier.	Une charge humide peut augmenter les volumes de gaz.
Four Noranda et El Teniente (pour 1 unité)	~ 120 à 150 et 70 à 190	Four équipé de hottes	Compact. Faible coût.	Durée de vie du garnissage du four : ~ 2 ans	Des procédés se développent rapidement et leur statut s'améliore avec le temps.
Inco Flash	~ 120 à 200	Four hermétique	Capacité de fusion élevée. Matte de grande qualité.	De l'oxygène pur autogène est utilisé d'où une fenêtre de fonctionnement étroite.	
Contop	~ 120	Four hermétique	Élimination importante du Bi et du Zn.	Faible rendement	Seulement une usine.
Procédé Vanyucov	~ 100 ou plus	Four équipé de hottes	Similaire à ceux du procédé Noranda.		Trop peu de données pour permettre une évaluation
Procédé Baiyin	~ 70	Four équipé de hottes	Similaire à ceux du procédé Noranda. Four divisé afin de fournir un décanteur intégral.		Trop peu de données pour permettre une évaluation

Suite du tableau en page suivante

Four	Capacité appliquée X 1 000 t/a	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
<i>Procédés couplés à fonctionnement continu</i>					
Mitsubishi	~ 120 à 240	Four hermétique	Peut également fondre des déchets achetés et des déchets d'anode. Capacité de fusion élevée. Pas de transfert en poche de coulée.	Certaines restrictions concernant la charge. Fonctionnement de l'installation couplé avec effet sur l'efficacité de la ligne complète. Teneur en soufre du blister.	3 ^{ème} installation construite.
<i>Procédés non couplés à fonctionnement continu</i>					
Procédé de conversion et de fusion flash Kennecott/Ou tokumpu	~ 300	Fours hermétiques	Stockage d'attente de la matte concassée. Pas de transfert en poche de coulée.	Investissement comparativement plus élevé mais coûts d'exploitation directs plus faibles.	2 ^{ème} usine commandée. Seul concept de procédé permettant le fonctionnement d'une usine non couplée. Fonctionnement sur différents sites possible.

Tableau 3.23 : Panorama des fours de fusion de cuivre primaire

3.3.3 Élimination du dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre produit lors des phases de fusion et de conversion peut avoir un impact grave sur l'environnement et est éliminé des gaz soit dans une unité de production d'acide sulfurique, soit par récupération sous forme de dioxyde de soufre. Les divers procédés utilisés pour éliminer le dioxyde de soufre sont décrits dans le Chapitre 2 du présent document. Le procédé utilisé dépend des marchés locaux du dioxyde de soufre liquide. On utilise généralement une technique de conversion en acide sulfurique [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Plusieurs facteurs sont spécifiques à l'industrie du cuivre. Toutes ces techniques sont à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

L'utilisation d'un enrichissement en oxygène dans les fonderies de cuivre entraîne une forte teneur en dioxyde de soufre dans les gaz provenant du four de fusion. Bien que celui-ci soit ensuite dilué jusqu'à 14 % de SO₂ pour la conversion, la réduction de volume des gaz permet de réaliser des économies non négligeables sur la taille des conduits, des ventilateurs et du dispositif de dépollution [tm 140, Finland Cu 1999; tm 107, Ullmanns 1996]. L'autre facteur est la possibilité d'utiliser l'excédent de chaleur présent dans le gaz, notamment après les phases de catalyse, qui sont extrêmement exothermiques ; toutefois, elles peuvent réduire la flexibilité afin d'accepter les variations du débit et de composition des gaz. La dilution du gaz mentionnée précédemment doit aussi fournir suffisamment d'oxygène pour le procédé catalytique.

L'autre facteur affectant la teneur en dioxyde de soufre est le contenu variable des gaz provenant du convertisseur de cuivre, comme décrit ci-dessus. Cette variation de la teneur en SO₂ implique que la

conception de l'unité de production d'acide doit tenir compte de ce point lors des phases de lavage et de transfert thermique ainsi que dans le choix du catalyseur. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le choix des catalyseurs est désormais plus important et des catalyseurs dopés en oxyde de césium peuvent permettre d'améliorer les performances.

Les performances d'une usine de production d'acide dans le secteur métallurgique dépendent des performances de la section de traitement des gaz. Si le système de traitement n'est pas efficace pour éliminer les impuretés des gaz entrants, les performances de la section de contact se dégraderont. Bien que la conception des systèmes d'épuration des gaz par voie humide puisse considérablement varier, elles possèdent les exigences et caractéristiques communes suivantes :

- Les contaminants solides doivent être éliminés de manière à obtenir une qualité de gaz finale de $< 1 \text{ mg/Nm}^3$ (visuellement limpide) ;
- La teneur en trioxyde de soufre du gaz doit être réduite à un niveau compris entre 15 et 25 mg/Nm^3 ;
- Les fluorures et les chlorures doivent être éliminés afin d'empêcher toute dégradation de la structure de la tour en briques située en aval et du catalyseur du conversion ;
- Les gaz doivent être refroidis à une température permettant d'obtenir un équilibre hydrique au sein de l'unité de production d'acide. La température dépend de la concentration en SO_2 dans les gaz et de la concentration de l'acide produit. Un gaz contenant de 4 à 6 % de SO_2 doit être refroidi à une température inférieure à 30 °C tandis qu'un gaz ayant une teneur en SO_2 très supérieure à 10 % peut tolérer des températures de gaz d'environ 35 à 40 °C, lors d'une production d'acide à 98,5 %.

Le taux de conversion du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre est généralement indiqué pour ces procédés : il est généralement compris entre 99,5 et 99,9 % pour les gaz produits lors des phases de fusion et de conversion du cuivre primaire. Cependant, plusieurs facteurs affectant le taux de conversion doivent être pris en compte au niveau local. Ces facteurs sont les suivants :

- Traitement des gaz entrants pour réduire la contamination du catalyseur (élimination du mercure en fonction du contenu de la charge, par exemple) ;
- Concentration et variabilité des gaz entrants. Les gaz les plus concentrés et les concentrations en SO_2 les plus régulières tendent à permettre des taux de conversion plus élevés. Cela est en partie dû au refroidissement régulier des gaz entre les étages, ce qui n'est possible qu'en présence de faibles variations de concentrations ;
- Choix du catalyseur. Les catalyseurs dopés en oxyde de césium ont tendance à augmenter les taux de conversion si les autres facteurs sont contrôlés afin de prévenir toute contamination. Les remplacements de catalyseur en routine peuvent être améliorés pendant les opérations d'entretien. Toutefois, pour être pleinement efficaces, ces améliorations doivent être accompagnées d'améliorations dans d'autres domaines ;
- Température, teneur en oxygène et équilibre hydrique des gaz entrants corrects (cf. ci-dessus) ;
- Réglage efficace des conditions gazeuses, notamment la température, entre les étages du catalyseur ;

Par conséquent, les taux de conversion varient avec le temps et les valeurs stables peuvent se révéler trompeuses. Toutefois, les exemples suivants montrent les performances pouvant être obtenues par des usines bien conçues utilisant des caractéristiques de gaz d'entrée différentes.

EXEMPLE 3.02 USINE DE PRODUCTION D'ACIDE SULFURIQUE FONCTIONNANT DANS DES CONDITIONS GAZEUSES VARIABLES

Description : Section de traitement et de lavage des gaz. Trois lignes d'unités de production d'acide sulfurique de contact à double absorption de type Lurgi, 4 et 5 étages, catalyseur moderne. Acide faible à neutralisation ~ 12 – 15 m³/h avec H₂SO₄ à 5 %, ainsi que décomposition thermique des purges d'acide avec des concentrations en acide supérieures (~ 50 %).

Principaux bénéfices environnementaux : Taux de conversion élevé pour le dioxyde de soufre. Taux supérieur à 99,6 % avec une installation récente.

Données opérationnelles :

Composé	Valeurs mesurées
Volume des effluents gazeux :	320 000 Nm ³ /h
SO _x	100 – 1 100 mg/Nm ³
SO ₃	20 – 40 mg/Nm ³
NO _x (sous forme de NO ₂)	20 – 45 mg/Nm ³
Cl- (sous forme de HCl)	2 – 7 mg/Nm ³
F- (sous forme de HF)	1 – 4 mg/Nm ³
Moyenne – poussières résiduelles :	< 2 mg/Nm ³
Plage – poussières résiduelles :	1 – 7 mg/Nm ³
Plage – composés :	
Cd	< 0,01 – 0,02 mg/Nm ³
Hg	< 0,01 – 0,07 mg/Nm ³
Tl	< 0,01 – 0,02 mg/Nm ³
As	< 0,01 – 0,1 mg/Nm ³
Se	< 0,01 – 0,02 mg/Nm ³
Sb	< 0,01 – 0,03 mg/Nm ³
Pb	< 0,01 – 0,15 mg/Nm ³
Cu	< 0,01 – 0,09 mg/Nm ³
PCDD/PCDF	0,001 – 0,01 ng ITE/Nm ³

Tableau 3.24 : Données relatives aux performances d'une usine de production d'acide sulfurique fonctionnant dans des conditions gazeuses variables

Effets croisés : - Effet positif – Réduction des principales émissions de dioxyde de soufre par conversion en acide sulfurique, récupération de la chaleur émise par les gaz et dégagée lors de la conversion.

Aspects économiques : Coût d'une ligne d'usine de fabrication d'acide installée : 55 million d'euros. Voir également l'Annexe consacrée aux coûts.

Applicabilité : Effluents gazeux provenant d'une fonderie primaire (concentration en SO_x > 6 % ; la combinaison avec les effluents gazeux provenant d'une fonderie de deuxième fusion est possible). Ces caractéristiques peuvent également s'appliquer à la plupart des installations existantes.

Exploitations de référence : Actuellement utilisé par une usine en Allemagne.

Documents de référence : [tm 124, DFIU Cu 1999 ; tm 210, Copper Expert Group 1999].

EXEMPLE 3.03 USINE DE PRODUCTION D'ACIDE SULFURIQUE FONCTIONNANT DANS DES CONDITIONS IDÉALES

Description : Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption, catalyseur moderne à 4 étages dopé au césium. Procédé Monsanto Enviro Chem 3:1 IPA

Principaux bénéfices environnementaux : Récupération maximale du dioxyde de soufre.

Données opérationnelles : Traitement combiné des gaz FSF et FCF contenant de 30 à 40 % de SO₂ dilué à 14 % à l'entrée de l'installation de contact à un débit annuel moyen de 171 300 Nm³. Un taux de conversion jusqu'à 99,9 % peut être atteint. L'usine repose sur une charge en dioxyde de soufre élevée et constante, sur un dispositif de traitement des gaz sophistiqué, sur un dispositif de refroidissement entre les étages et sur un catalyseur dopé en césium. Les émissions de dioxyde de soufre dans les gaz de queue (moyenne annuelle) sont de l'ordre de 150 mg/Nm³.

Effets croisés : - Effet positif - Réduction des principales émissions de dioxyde de soufre, récupération de l'énergie.

Aspects économiques : Non évaluées, mais le procédé a récemment été mis en place et semble économiquement viable.

Applicabilité : Au cas par cas afin d'obtenir des conditions gazeuses idéales à l'alimentation de l'unité.

Exploitations de référence: Utilisé dans une usine aux Etats-Unis.

Documents de référence : [tm 140, Finland Cu 1998].

L'autre facteur important concernant les gaz très concentrés utilisés dans une unité de production d'acide sulfurique est la teneur en SO₂ résiduel des gaz émis. La plupart des usines européennes atteignent un taux de conversion compris entre 99,5 et 99,8 % avec une concentration en entrée de 8,4, 10, 11 ou 13 % de SO₂ dans l'installation de contact. Le taux de conversion exclut les périodes de démarrage et d'arrêt et les cas d'urgence.

3.3.4 Procédés de deuxième fusion

La gamme de matériaux secondaires et la variation de la teneur en cuivre et du degré de contamination a conduit au développement d'une gamme de fonderies destinée aux matériaux de deuxième fusion [tm 137 Copper Expert Group 1998]. En Europe, le mini-four, le haut fourneau, le four ISA Smelt, le four TBRC et le four électrique étanche à arc immergé sont utilisés pour une vaste gamme de matériaux. Toutes ces techniques sont des techniques à prendre en compte en fonction du type de matière première.

Le mini-four est utilisé pour les matières premières secondaires et pour les laitiers et utilise du fer et des déchets à haute teneur en fer comme réducteur. Le convertisseur est utilisé pour la transformation de cuivre noir contenant du fer provenant des fours de fusion et pour la fusion des déchets d'alliages. Le four réverbère à creuset est utilisé pour l'affinage du cuivre et des déchets à haute teneur en cuivre du convertisseur.

Le Tableau 3.24 récapitule les avantages et les inconvénients des fours de seconde fusion pour les charges de qualité inférieure.

Plusieurs des techniques décrites dans le Chapitre 2 peuvent s'appliquer aux dispositifs d'extraction et de dépollution des fumées et aux systèmes de contrôle du procédé utilisé par ces fours. Ces techniques ne sont généralement pas utilisées par toutes les installations au moment de la rédaction du présent document. Le système de contrôle du procédé du haut fourneau est considéré comme pouvant encore être développé et son éventuelle inclusion dans la liste dépendra de ce facteur.

Les gaz provenant des fonderies de deuxième fusion contiennent généralement peu ou pas de dioxyde de soufre pour peu que l'on évite les matériaux sulfurés, mais peut contenir des quantités significatives

de métaux plus volatils tels que le plomb, le zinc, etc. Ils peuvent également contenir des COV, des dioxines, du CO et des poussières. C'est pourquoi les phases de dépollution dans le cas de la fusion de deuxième fusion implique un refroidissement des gaz (avec récupération de la chaleur/de l'énergie), une post-combustion pour détruire le carbone organique et les dioxines, une séparation des grosses particules, si nécessaire, et une filtration sur tissu. Les poussières collectées sont recyclées afin de récupérer ces métaux.

EXEMPLE 3.04 DESTRUCTION DES DIOXINES

Description : Injection d'oxygène dans la partie supérieure du haut fourneau. L'espace offert par le procédé concerné ne permet pas l'installation d'un dispositif de post-combustion. Il existe certaines restrictions concernant le degré de mélange de gaz atteint, mais les performances sont globalement acceptables. Des systèmes de contrôle peuvent être développés pour le système.

Principaux bénéfices environnementaux : Destruction des dioxines. Destruction du CO et des autres formes de carbone.

Données opérationnelles : Quantité de dioxines < 0,5 ng/Nm³ TEQ atteinte.

Effets croisés : - Effet globalement positif - Réduction des principales émissions. Coûts en énergie liés à la production d'oxygène.

Aspects économiques : Non disponibles, mais la technique n'implique qu'une modification peu coûteuse et est économiquement viable.

Applicabilité : La plupart des hauts fourneaux à chargement par le haut et peut-être d'autres procédés.

Exploitations de référence : Actuellement utilisé par des usines en Allemagne.

Documents de référence : [tm 124, DFIU Cu 1999].

Four	Gamme de capacité	Besoins en matière de collecte et de dépollution des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Haut-fourneau	~ 150 à 200 tonnes par jour et par four	Semi-hermétique. Refroidissement des gaz*, post-combustion et traitement (filtre à manches)	Matériau de faible qualité	Contrôle de procédé peu développé	Amélioration du contrôle de procédé nécessaire avant inclusion. La capacité de production dépend du type de charge et de la teneur en cuivre
Four électrique à arc immergé	Pour un four de 8 MVA : 8 – 25 tonnes par heure de fusion	Hermétique. Post-combustion, refroidissement et traitement des gaz**	Convient pour les déchets informatiques. Faible volume de gaz.	Certaines restrictions liées à la charge.	Le CO formé brûle dans le four pour fournir de la chaleur. La capacité de production dépend de la teneur en cuivre de la charge et des spécifications du four.
Mini-four		Fermé. Refroidissement* et traitement des gaz (filtre à manches)	Capacité de fusion élevée. Compact.	Certaines restrictions liées à la charge.	
Convertisseur rotatif à soufflage par le haut (procédé Top Blown Rotary Converter - TBRC)	Jusqu'à ~ 40 à 70 tonnes par lot	Fermé. Refroidissement* et traitement des gaz (filtre à manches)	Gamme de matériaux. Capacité de fusion élevée. Compact. Rotation.	Coûteux	
Four ISA Smelt	~ 30 000 à 40 000 tonnes par an	Hottes. Refroidissement* et traitement** des gaz.	Gamme de matériaux. Capacité de fusion élevée.	En développement.	Non éprouvé pour les matériaux de qualité inférieure dans une atmosphère réductrice. Phase de mise en service du procédé en discontinu avec des charges contenant du soufre et produisant de la matte et des produits de la conversion de la matte.
Convertisseur	~ 15 à 35 tonnes par lot et par convertisseur	Équipé de hottes. Refroidissement et traitement des gaz** (filtre à manches)			Pour le traitement du cuivre noir provenant des fours de fusion et de la fusion des alliages de cuivre.
Four à cuve à creuset	~ 250 t/jour	Hermétique et équipé de hottes. Post-combustion, refroidissement et traitement des gaz (filtre à manches)	Utilisé pour la fusion et l'affinage du métal. Bon rendement énergétique.	Certaines restrictions liées à la charge.	Affinage thermique des déchets de qualité supérieure, des anodes et du blister.
Procédé Contimelt	50 – 100 t/heure	Post-combustion (four de réduction), WHB, traitement (filtre à manches)	Capacité de production élevée. Grande consommation d'énergie.	Certaines restrictions liées à la charge.	Affinage thermique des déchets de qualité supérieure, des anodes et du blister.
Four réverbère à creuset	~ 250 à 400 tonnes par jour	Semi-étanche et équipé de hottes. Refroidissement, post-combustion et traitement des gaz* (filtre à manches)	Utilisé pour la conversion et l'affinage.	Étanchéité. Certaines restrictions liées à la charge.	Peut utiliser des tuyères associées à un système d'inclinaison. Affinage thermique des déchets de qualité supérieure et du blister.
Note. *) Si le niveau de température est suffisamment élevé, la récupération de la chaleur résiduelle peut être envisagée. Pour le traitement dans un filtre à manches, un refroidissement supplémentaire est requis. **) Dans l'UE, les effluents gazeux peuvent contenir du dioxyde de soufre lors de certaines campagnes. Par conséquent, ils sont traités dans un laveur ou envoyés dans une unité de production d'acide sulfurique.					

Tableau 3.25 : Panorama des fours de fusion utilisés pour la production de cuivre de deuxième fusion

3.3.5 Conversion

3.3.5.1 Convertisseurs de cuivre de première fusion

Le dispositif utilisé en Europe pour la conversion est le convertisseur Peirce-Smith (ou équivalent). Il est aussi largement utilisé dans le reste du monde [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Ce type de convertisseur offre un niveau de performances très fiable et efficace. Ils sont capables d'atteindre un niveau de traitement métallurgique élevé et peuvent être utilisés pour vaporiser les métaux présents tels que le plomb et le zinc qui peuvent alors être récupérés. La chaleur générée lors de la transformation est également disponible pour fondre les déchets de cuivre (déchets anodique, par exemple) et ce facteur constitue un avantage important. Ils présentent toutefois l'inconvénient de nécessiter un chargement et un transfert de matériaux au moyen de poches de coulée, de bennes ou de moules.

C'est une source potentielle de fumées fugitives contenant de la poussière, des métaux et du dioxyde de soufre. La poche de coulée ou la benne utilisée pour le chargement peut interférer avec le positionnement efficace des hottes de captage des fumées. Le bon fonctionnement du convertisseur repose par conséquent sur l'utilisation de hottes de captage des fumées primaires et secondaires lors du chargement et du soutirage afin de capter le plus possible d'émissions fugitives. Des poussières, des fondants, du carburant, des déchets, etc., peuvent être ajoutés à travers la hotte. Des commandes automatiques peuvent empêcher le soufflage durant les périodes où le convertisseur est mis en place ou retiré.

Ces procédés et les techniques de contrôle et de collecte des fumées conviennent aux installations nouvelles et existantes et constituent des techniques à prendre en compte.

D'autres procédés de conversion sont également utilisés dans le monde [tm 137 Copper Expert Group 1998] : ils constituent également des techniques à prendre en compte. Les phases de conversion utilisées dans les procédés de conversion flash/fusion flash Mitsubishi et Outokumpu/Kennecott en continu ne nécessitent pas de transfert en poches de coulée. Par conséquent, cette source de fumées secondaires est éliminée. Toutefois, ces deux procédés nécessitent toujours un dispositif de collecte des fumées au niveau des chenaux et des trous de coulée et le procédé de conversion flash dépend de la matte venant du four, de la granulation du laitier, du broyage et de la manutention de la matte, qui peuvent être une source potentielle de certaines émissions dans l'air et dans l'eau. Néanmoins, ces procédés sont par nature plus propres et le contrôle des émissions repose moins sur l'entretien et le soin apporté par l'opérateur. Dans le four de conversion Mitsubishi, la matte s'écoule dans un bain de cuivre en fusion et réagit en formant du laitier et du métal ; grâce à cette réaction, le cuivre blister quittant le convertisseur et entrant dans le four à anode a une teneur élevée en soufre. Les effluents gazeux sont par conséquent comparativement plus chargés en dioxyde de soufre et nécessitent une élimination du SO_2 lors de la phase d'affinage thermique.

Les gaz captés lors du cycle de conversion sont refroidis, traités et envoyés dans un système de récupération du soufre. Comme nous l'avons signalé précédemment, la teneur en SO_2 des gaz issus du fonctionnement du convertisseur est variable et est généralement comprise entre 6 et 12 %, pendant toute la durée du cycle de conversion, les gaz sont mélangés aux gaz concentrés dégagés lors de la phase de fusion. Les procédés de conversion en continu génèrent des concentrations en SO_2 élevées et constantes. Par conséquent, ils permettent l'utilisation de systèmes de manutention, de traitement et de refroidissement des gaz comparativement plus petits et des phases de conversion du soufre plus courtes.

Le four ISA Smelt est également utilisé dans le cadre d'un procédé combiné associant une fusion en discontinu et une conversion de la matte de cuivre/plomb en cuivre blister.

Convertisseur	Gamme de capacité	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
<i>Convertisseurs en discontinu</i>					
Peirce-Smith (ou équivalent)	De ~ 100 à 250 (primaire) et de ~ 15 à 35 (secondaire) tonnes par lot de cuivre	Hottes primaires et secondaires	Simple technologie éprouvée. Fusion de l'anode et des autres déchets. Robuste et flexible. Bonnes performances métallurgiques. Vaporisation de certaines inclusions métalliques.	Repose sur des transferts en poches de coulée	Procédé très connu. Utilisé pour la production de cuivre primaire et de deuxième fusion. Chargement par les hottes utilisé.
Hoboken	De ~ 50 à 100 tonnes par lot de cuivre	Siphon pour la collecte des gaz primaires	Collecte des gaz plus facile	Blocage dans un goulot d'étranglement. Transfert en poche de coulée	Essentiellement primaire. Egalement utilisé pour la conversion du cuivre/plomb en matte.
procédé Top Blown Rotary Converter – TBRC (CRSH)	De ~ 40 à 70 tonnes par lot de cuivre	Fermé	Fusion secondaire des déchets		Utilisé pour la production de deuxième fusion
ISA Smelt	Environ 40 000 tonnes par an	Hottes, refroidissement et traitement des gaz			Primaire et secondaire. Généralement non éprouvé. Appliqué au moment de la rédaction du document à la conversion en discontinu du Cu/Pb en matte.
<i>Convertisseurs intégrés</i>					
Mitsubishi	Jusqu'à ~ 240 000 tonnes de cuivre par an	Etanche	Forte concentration en SO ₂	Mise en place difficile dans les installations existantes. Etroitement lié au procédé de fusion.	Primaire uniquement. Pratiques supplémentaires. Traitement des déchets de Cu. Peut être utilisé avec d'autres fours de fusion.
Kennecott/Outokumpu	Environ 300 000 tonnes de Cu par an	Etanche	Forte concentration en SO ₂ . Stockage temporaire de la matte.	Fusion des déchets d'anode pas encore disponible. A ce jour, uniquement utilisé dans un four de fusion. Un deuxième est en construction.	Primaire uniquement.

Tableau 3.26 : Panorama des convertisseurs destinés à la production de cuivre primaire et secondaire

3.3.5.2 Convertisseurs de cuivre de deuxième fusion

Comme cela est mentionné dans le document [tm 137, Copper Expert Group 1998], le procédé de conversion le plus courant pour la production de cuivre de deuxième fusion utilise le convertisseur Peirce-Smith (ou un convertisseur équivalent), le four CRSH (procédé Top Blown Rotary Converter – TBRC) et le four ISA Smelt. Le four CRSH, utilisé en tant que convertisseur, est compact et est normalement totalement fermé, ce qui permet la collecte des fumées secondaires. Des déchets d'alliages de cuivre sont ajoutés dans le convertisseur. Du carbone est également ajouté pour assurer l'équilibre thermique et pour séparer des éléments tels que le zinc ou l'étain par volatilisation sous atmosphère réductrice. Les mêmes remarques s'appliquent aux systèmes de collecte des fumées utilisés pour la production de cuivre primaire. Par conséquent, le bon fonctionnement du convertisseur repose sur l'utilisation de hottes de captage des fumées primaires et secondaires lors des phases de chargement et de coulée afin de capter le plus d'émissions fugitives possible. Des poussières telles que les fondants et du carburant peuvent être ajoutés par les hottes. Des commandes automatiques peuvent permettre d'éviter le soufflage pendant les périodes où le convertisseur est retiré. Les gaz issus de la conversion de cuivre de deuxième fusion sont traités par refroidissement (avec récupération de la chaleur/de l'énergie, si possible), séparation des grosses particules et élimination du dioxyde de soufre, si nécessaire, et par filtration dans un filtre à manches.

Ces procédés et ces techniques de contrôle et de collecte des fumées conviennent aux installations nouvelles et existantes et constituent des techniques à prendre en compte.

3.3.6 Affinage thermique

L'affinage thermique a été décrit précédemment. Les fours tournants, les fours réverbère à creuset, les fours à cuve à creuset et le procédé Continelt sont des techniques à prendre en compte pour les fonderies de première et de deuxième fusion. Ils comportent des ajouts de gaz via des tuyères ou des lances. Le four à cuve à creuset et le procédé Continelt sont conçus pour les charges solides. Le four réverbère à creuset prend les charges de cuivre solide et en fusion tandis que le four tournant prend essentiellement les charges de cuivre en fusion. Une charge de cuivre en fusion nécessite normalement le recours à un transfert en poche de coulée pour le chargement et une certaine quantité d'émissions fugitives doit être envisagée en raison des problèmes potentiels liés à ce phénomène. Les ajouts de déchets dans les fours d'affinage peuvent générer des émissions fugitives et des déchets contaminés par des matières organiques doivent être évités. Le taux d'ajout de déchets peut être contrôlé.

Des systèmes de collecte des fumées sont utilisés dans les fours d'affinage thermique. Le système de dépollution requis dépendra du matériau utilisé. Les gaz et les fumées provenant du four sont captés, soumis à une post-combustion lors de la phase de réduction, refroidis et traités à l'aide de filtres à manches ou de laveurs. Selon la quantité de soufre présente dans le convertisseur, du dioxyde de soufre devra peut-être être éliminé au moyen d'un laveur basique, par exemple. Lors de l'affinage thermique du cuivre blister provenant d'un four de conversion Mitsubishi, les effluents gazeux peuvent être comparativement plus chargés en dioxyde de soufre et nécessiter une élimination du SO_2 .

La récupération de la chaleur provenant des effluents gazeux des fours d'affinage est une technique à prendre en compte dans les unités de fusion de charges solides de grande capacité.

La coulée de cuivre en fusion depuis un four à anode dans une roue de coulée ou dans une machine de coulée en continu sont des techniques à prendre en compte.

Les procédés et les techniques destinés au contrôle, à la collecte des fumées et à l'élimination du dioxyde de soufre conviennent aux installations nouvelles et aux installations existantes.

3.3.7 Affinage électrolytique

Les procédés d'affinage électrolytique sont caractérisés par des dimensions de cuve optimales (espacement, taille de la cuve, etc.). L'utilisation de cathodes en acier inoxydable ou de feuilles de départ de cuivre sont des techniques à prendre en compte. S'agissant des cellules électrolytiques existantes, les frais liés au passage à des anodes préformées en acier inoxydable peuvent ne pas être justifiés et des plaques de départ de cuivre seront alors utilisées. Le décapage mécanisé (et automatique) ainsi que la détection plus élaborée de court-circuits mériteraient aussi d'être pris en compte, selon la taille de l'opération.

La récupération du cuivre contenu dans les solutions implique une extraction électrolytique et, dans certains cas, des gaz sont émis au niveau de l'anode et peuvent produire un brouillard acide. La collecte et l'élimination de ces brouillards est une technique à prendre en compte.

L'utilisation de systèmes d'évacuation étanches dans les cellules électrolytiques, la recirculation de toutes les solutions collectées, la récupération des boues anodiques et la purge de l'électrolyte sont également des techniques à prendre en compte.

3.3.8 Procédés de traitement du laitier

Il existe différentes sources de laitier au cours du procédé. Les techniques à envisager dépendent de la source, mais globalement les laitiers de fusion et certains laitiers de conversion peuvent être traités dans des fours de traitement de laitier (électriques) lorsque du carbone est ajouté et que le laitier est décuivré pour produire de la matte et du laitier propre. Certains laitiers riches en cuivre tels que le laitier de conversion peuvent être renvoyés dans le four de fusion ou être lentement refroidis. Il est alors possible de récupérer une certaine part riche en cuivre au moyen d'un dispositif de flottation du concentré par exemple. Le traitement du laitier par injection de charbon dans le bain de laitier à l'aide d'un four tournant est également une technique à envisager. La vaporisation du laitier et la remise en circulation du laitier dans le four de fusion (phase de réduction ou phase de fusion de la matte) sont également des techniques à envisager.

Le laitier décuivré a une très faible teneur en métaux lixiviables et possède plusieurs propriétés utiles qui permettent son utilisation dans le génie civil et comme moyen de grenaillage. L'utilisation ou le recyclage des laitiers et le recyclage des poussières sous filtre sont considérés comme faisant partie du procédé.

3.3.9 Procédés hydrométallurgiques

Le procédé hydrométallurgique de l'oxyde de cuivre et minerais sulfurés de faible qualité n'est pas pratiqué en Europe au moment de la rédaction de ce document, mais il pourrait prochainement être utilisé (sur un site minier, par exemple). Le procédé de base décrit précédemment et dans le Chapitre 2 peut comporter plusieurs variantes en fonction des caractéristiques du minerai. Les rapports détaillés devraient être consultés [tm 130, Chadwick 1994 ; tm 137, Cu Expert Group 1998].

Puisque le procédé hydrométallurgique implique la lixiviation, l'extraction par solvant et l'électrolyse, une élimination appropriée du lixiviat doit être considérée de même que le confinement des mélangeurs et des cuves de décantation utilisés pour l'extraction par solvant. Les techniques abordées dans le Chapitre 2 pour prévenir les émissions dans l'eau par exemple en confinant les systèmes d'évacuation sont appropriées tous comme les techniques permettant de récupérer les COV et d'utiliser des solvants bénins.

3.3.10 Étain et autres métaux

Les procédés qui ont été décrits précédemment comme des techniques disponibles sont tous considérés comme étant des techniques à envisager pour la détermination des MTD. Les charges spécifiques

influenceront le choix du procédé final. Les techniques abordées dans le Chapitre 2 doivent également être considérées conjointement avec ces procédés.

3.3.11 Fil-machine de cuivre

Les procédés qui ont été décrits précédemment comme étant des techniques disponibles sont tous considérés comme étant des techniques à envisager pour la détermination des MTD. L'utilisation de commandes avancées sur les brûleurs d'un four à cuve afin d'optimiser la combustion et de maintenir des niveaux minimum de CO tout en préservant la qualité du produit doit être envisagée.

3.3.12 Lingots, tubes et produits semi-finis

Les charges spécifiques et les produits finis influenceront le choix du procédé et les facteurs abordés dans la section consacrée au fil-machine s'appliqueront. Si des alliages de cuivre sont utilisés dans le procédé, les températures de fusion devront être contrôlées, toute fumée générée lors de la fusion et de la coulée devront être captées de manière efficace et traitées dans un filtre à manches. Le ZnO présent dans les fumées peut être récupéré. Les techniques de contrôle de la température et du procédé abordées dans le Chapitre 2 devront également être envisagées conjointement avec ces procédés.

3.3.13 Collecte et dépollution des fumées/gaz

Les techniques de collecte et de dépollution des gaz abordées dans les sections 2.7 et 2.8 de ce document sont des techniques à envisager pour les différentes étapes du procédé impliqués dans la production de cuivre, etc.

L'identification de toute contamination organique des matières premières secondaires est particulièrement importante à envisager de manière à ce que la combinaison de systèmes de prétraitement, de fusion et de dépollution la mieux adaptée puisse être utilisée afin d'éviter les émissions fugitives et de détruire les dioxines et autres composés organiques présents dans les effluents gazeux.

L'utilisation de hottes secondaires est également une technique à envisager. L'utilisation de systèmes intelligents pour le ciblage de la collecte des fumées peut réduire la consommation d'énergie de ces systèmes. Il existe différents problèmes spécifiques à chaque site dont certains sont abordés dans la section 3.3.1.1 du présent chapitre. La conception des systèmes de hottes doit tenir compte de l'accès au point de chargement et des autres opérations sur le four ainsi que de la manière dont la source des gaz de procédé change au cours du cycle du procédé. Globalement, les technologies abordées dans ce chapitre combinées à un système de dépollution adapté répondront aux demandes les plus exigeantes en termes de protection de l'environnement.

Source	Composé présent dans les effluents gazeux	Méthode de traitement
Mauvaise combustion, composé organique dans la charge	CO, COV, dioxines	Contrôle du procédé. Post-combustion. Injection de charbon actif.
Présence de soufre dans le combustible ou dans la matière première	Dioxyde de soufre	Système d'épuration par voie sèche ou semi-sèche, injection de chaux.
Conditions de combustion	NO _x	Contrôle du procédé, utilisation correcte de l'oxygène. Réduction catalytique.
Four et manutention des matériaux en fusion	Poussières Fumées d'oxydes métalliques	Laveur et/ou filtre à manches

Tableau 3.27 : Méthodes de dépollution à envisager

EXEMPLE 3.05 TRAITEMENT CIBLÉ DES FUMÉES SECONDAIRES

Description : Traitement des fumées secondaires et des gaz de ventilation par absorption du SO₂ et au moyen d'un filtre à manches.

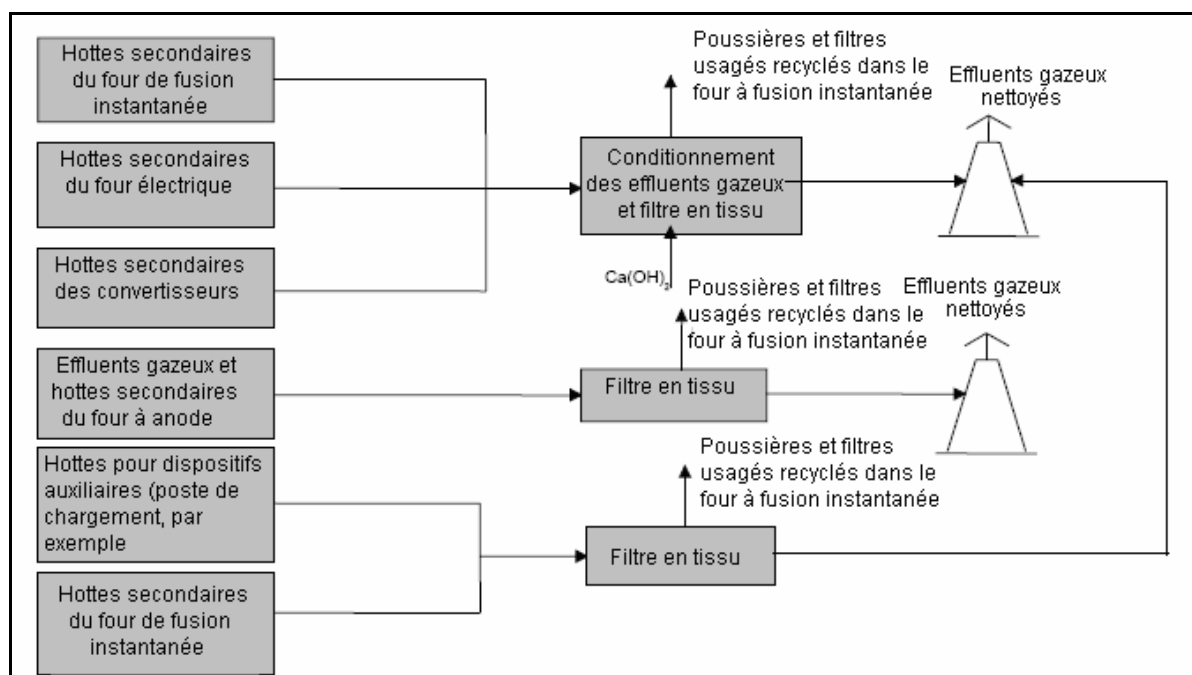


Figure 3.12 : Disposition générale du système [SUR FIGURE : nombreuses corrections à apporter]

Gaz secondaires provenant de la zone de ventilation :	Hottes secondaires du convertisseur, hottes des fours électriques de traitement des laitiers, effluents gazeux du four électrique de traitement du laitier, systèmes de ventilation du four à fusion flash, fours à anode, retours de la manutention et la préparation.
Caractéristiques en entrée : Volume de conception max. : Variation de volume : Absorbant pour l'élimination du SO ₂ : Teneur moyenne en absorbant et en poussières : Plage de teneur en poussières : Plage du SO ₂ en entrée :	580 000 Nm ³ /h ~ 350 000 à 550 000 Nm ³ /h Chaux hydratée 1 500 mg/Nm ³ 1 – 5 g/Nm ³ 100 – 1 500 mg/Nm ³
Caractéristiques en sortie : Variation de volume : Poussières résiduelles (moyenne) : Poussières résiduelles (plage) : Composés de la gamme : Cd As Ni Se Sb Cu Absorption du soufre	~ 350 000 à 550 000 Nm ³ /h < 2 mg/Nm ³ 1 – 7 mg/Nm ³ < 0,01 – 0,1 mg/Nm ³ < 0,01 – 0,8 mg/Nm ³ < 0,01 – 0,3 mg/Nm ³ < 0,01 – 0,9 mg/Nm ³ < 0,01 – 0,5 mg/Nm ³ < 0,02 – 2 mg/Nm ³ ~ 50 à 70 %

Tableau 3.28 : Données relatives aux performances du système

L'installation utilise un système de trois hottes secondaires en plus de la hotte principale. Ces hottes peuvent être raccordées soit à l'unité de production d'acide sulfurique (hotte 1), soit au système d'épuration secondaire (hottes 2 et 3). Lors des opérations de chargement et de coulée, chaque hotte est acheminée par un moteur jusqu'aux positions requises afin de garantir une efficacité de collecte optimale. Des commandes intelligentes sont utilisées. La disposition des hottes du convertisseur est indiquée ci-dessous :

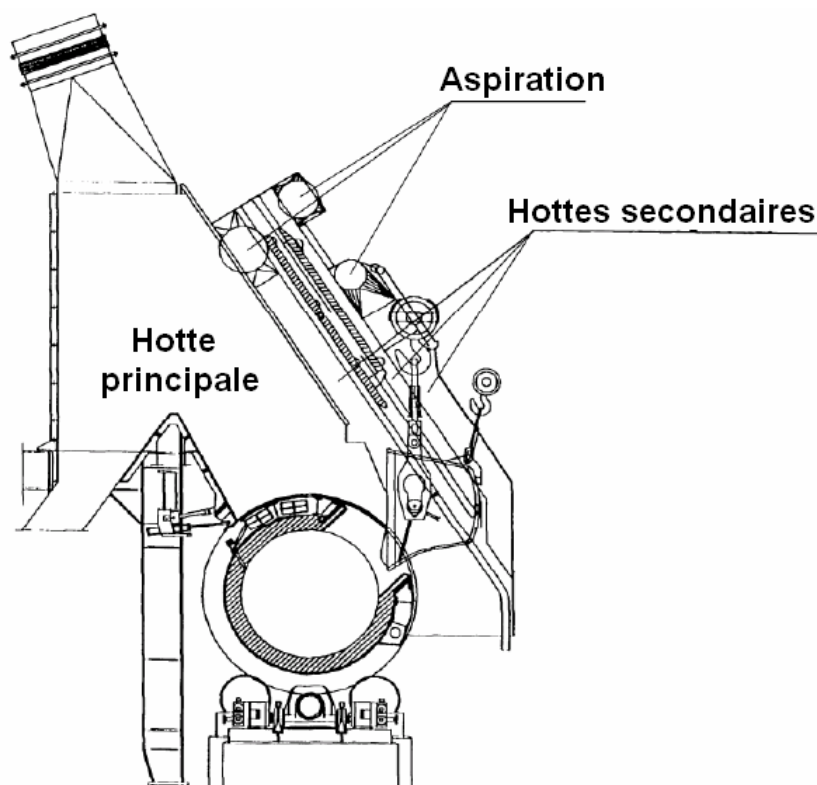


Figure 3.13 : Système de captage ciblé des fumées secondaires

[tm 201, Velten 1999]

Principaux bénéfices environnementaux : Collecte et traitement des émissions fugitives. Minimisation de la consommation d'énergie.

Données opérationnelles : Taux de captage des fumées de 99 %.

	Émissions de poussières (en kg/a)	
	Avant collecte supplémentaire des gaz secondaires (1992)	Après collecte supplémentaire des gaz secondaires (1996)*
Production d'anodes (t/a)	220 000	325 000
Émissions fugitives :		
Total fonderie	66 490	32 200
Toiture de la fonderie	56 160	17 020
Émissions contrôlées (fonderie primaire) : -		
Fonderie/unité de production d'acide sulfurique	7 990	7 600
Cheminée des hottes secondaires	2 547	2 116
Note. * Émissions après un investissement de 10 millions d'euros destiné à améliorer le système de captage et de traitement des gaz fugitifs. Consommation d'énergie supplémentaire = 13,6 GWh/a		

Tableau 3.29 : Performances des améliorations apportées au captage des fumées secondaires

Effets croisés : - Effet positif - Réduction de la consommation d'énergie comparée à la quantité totale d'air de ventilation captée, réduction des principales émissions

Aspects économiques : 23 millions de DM pour le système complet comprenant : hottes, conduites, commandes. Consommation d'énergie de 13,6 GWh/a. Cf. également annexe sur les coûts.

Applicabilité : La plupart des procédés de conversion. Convient pour toute une gamme de fours (fours El Teniente et Noranda, par exemple).

Exploitations de référence : Allemagne.

Documents de référence : [tm 161, Petersen 1999] ; [tm 92, Cu Expert Group 1998].

EXEMPLE 3.06 COLLECTE DES GAZ DE VENTILATION AU NIVEAU DU TOIT

Description : Système de collecte des fumées installé sur le convertisseur pour traiter les gaz de ventilation. Tous les gaz de ventilation sont captés au niveau du toit. Ils sont traités de manière à éliminer les poussières, les métaux et le dioxyde de soufre.

Principaux bénéfices environnementaux : Collecte des émissions fugitives provenant du convertisseur.

Données opérationnelles : 99,9 % des fumées sont captées au niveau du bâtiment contenant la fonderie/convertisseur (production de 170 000 t/a d'anodes). Les gaz sont traités conjointement avec les gaz provenant du sécheur. Élimination limitée du SO₂ possible avec le système actuel utilisant un électrofiltre.

Émissions	Point d'émission		
	Captage primaire 200 000 Nm ³ /h	Captage secondaire 100 000 Nm ³ /h	Émissions fugitives
Dioxyde de soufre	523 t/a	2 242 t/a	147 t/a

Tableau 3.30 : Performances en matière de traitement des gaz après captage au niveau du toit

Effets croisés : - Effet globalement positif – Très consommateur d'énergie, mais réduction de la quantité totale d'émissions.

Aspects économiques : Non disponibles, mais deux usines sont exploitées de manière viable.

Applicabilité : La plupart des procédés de conversion.

Exploitations de référence : Suède, Finlande

Documents de référence : [tm 140, Finland Cu 1999] ; [tm 106, Farrell 1998].

L'utilisation de hottes pour la vidange et la coulée est également une technique à envisager. Les fumées émises lors de la vidange sont constituées des poussières des lances à oxygène, des poussières de fraisage, des fumées provenant des débouchures vaporisées en cas d'utilisation d'un pistolet de piquage et des fumées provenant de toutes les surfaces de métal et de laitier exposées. Ces fumées seront principalement composées d'oxydes des métaux générés durant le procédé de fusion.

Les gaz provenant du four sont généralement captés très chauds et une technique de refroidissement ou de récupération de l'énergie est utilisée pour éviter d'endommager l'équipement de dépollution. Pour le cuivre primaire, on utilise une technique basée sur la conversion en acide sulfurique ou la production de dioxyde de soufre. Des filtres à manches et/ou des laveurs sont utilisés pour le cuivre de deuxième fusion et pour les phases de séchage et d'affinage thermique. Des méthodes d'épuration et de désulfuration des gaz par voie sèche sont des techniques à envisager pour éliminer les concentrations plus faibles en dioxyde de soufre.

Les deux exemples suivants illustrent l'utilisation des techniques de post-combustion, de refroidissement, de neutralisation et de filtration.

EXEMPLE 3.07 POST-COMBUSTION, REFROIDISSEMENT DES GAZ ET FILTRE À MANCHES

Description : Chambre de post-combustion et traitement des gaz comprenant un traitement au coke/à la chaux suivi par un passage dans un filtre à manches. Système de post-combustion utilisé pour un haut-fourneau produisant 15 200 t/a de cuivre noir. Volume des gaz : 32 000 Nm³/h.

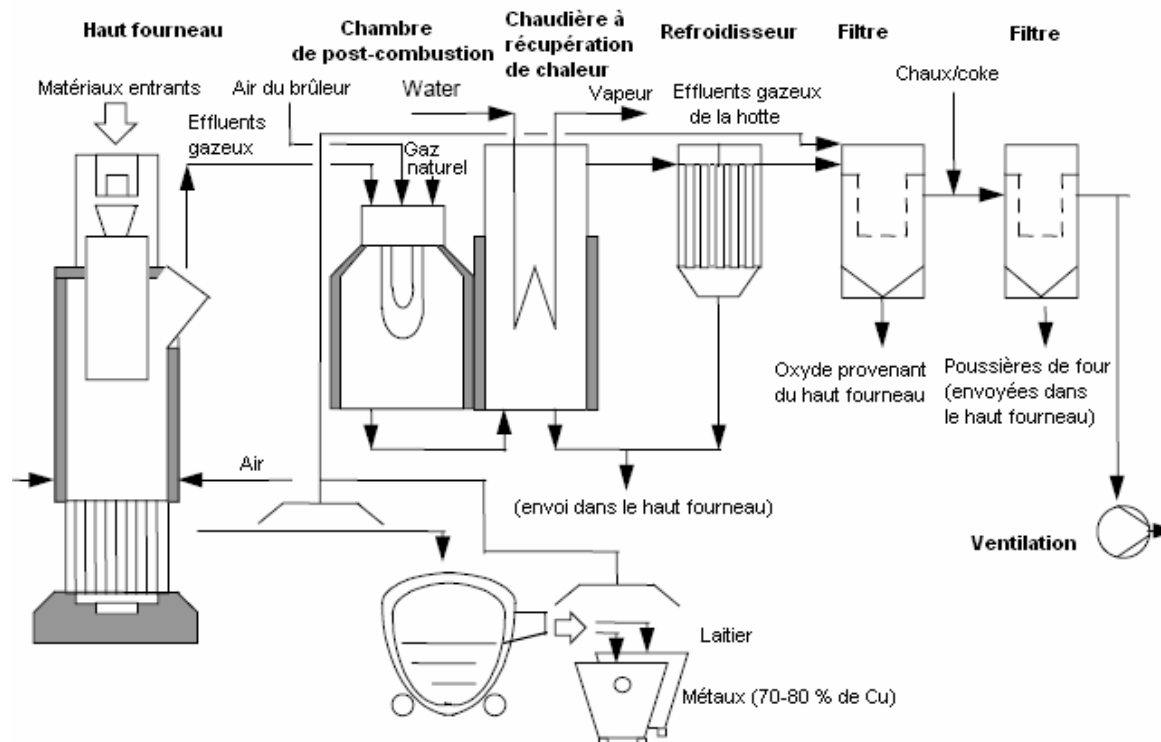


Figure 3.14 : Disposition générale d'un système de post-combustion

Principaux bénéfices environnementaux : Destruction des dioxines. Destruction du CO et des autres formes de carbone.

Données opérationnelles : Obtention d'un taux de dioxines < 0,1 ng/Nm³ TEQ.

Effets croisés : Effet positif - Réduction des principales émissions. Récupération des autres métaux.

Aspects économiques : Coût d'installation du système de post-combustion et du filtre à manches ~ 1,5 million d'euros. Voir également l'annexe consacrée aux coûts.

Applicabilité : La plupart des hauts fourneaux, convient également aux autres fours avec la même nécessité de refroidir les gaz et d'éliminer le CO, le SO₂ et les poussières.

Exploitations de référence : Utilisé dans des usines en Autriche et en Allemagne.

Documents de référence : [tm 124, DFIU Cu 1999], [tm 160, Winter Cu 1999], [tm 226, VDI 2102 1999]

EXEMPLE 3.08 REFROIDISSEMENT DES GAZ ET FILTRE À MANCHES

Description : Système de refroidissement des gaz et filtre à manches. Comprend une injection de chaux si les gaz contiennent du dioxyde de soufre.

Principaux bénéfices environnementaux : Traitement des gaz issus du convertisseur et des fours d'affinage thermique afin d'en éliminer les métaux et les poussières.

Données opérationnelles : Poussières – 1-3 mg/Nm³. Cu+Pb+Zn < 0,2 mg/Nm³

Effets croisés : - Effet positif – Réduction efficace de la quantité de poussières et de métaux. Récupération du Zn, du Pb, etc.

Aspects économiques : Non disponible, mais des exploitations viables existent. Procédé similaire dans l'annexe consacrée aux coûts.

Applicabilité : La plupart des convertisseurs et des fours à anode. Convient aux sécheurs.

Exploitations de référence : Utilisé dans une usine en Autriche.

Documents de référence : [tm 160, Winter Cu 1999]

3.3.14 Régulation et gestion du procédé

Les principes de régulation et de gestion du procédé tels que l'utilisation des systèmes ISO 9000 abordés dans le Chapitre 2 sont applicables aux procédés de production utilisés dans ce Groupe. Certains des fours et des procédés peuvent être améliorés grâce à l'adoption de nombreuses de ces techniques. Le contrôle de la température des fours de fusion utilisés pour les alliages de cuivre est une technique à envisager. La formation des opérateurs, la fourniture d'instructions opérationnelles et les systèmes de gestion nécessaires à la mise en place de ces facteurs sont essentiels. Des systèmes d'entretien préventif doivent également être envisagés lorsque cela est justifié ou nécessaire.

3.3.15 Eaux usées

C'est un problème spécifique à chaque site. Les systèmes de traitement existants sont reportés comme étant de bonne facture. La totalité des eaux usées doit être traitée afin d'éliminer les métaux et les solides dissous. Les techniques énumérées dans le Chapitre 2 sont les techniques à envisager. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés. Les eaux de ruissellement, si elles sont recueillies et stockées séparément, doivent être traitées par décantation et/ou par ajustement du pH avant d'être rejetées.

EXEMPLE 3.09 TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Description : Traitement de l'acide faible provenant de l'unité de production d'acide sulfurique, diverses eaux de lavage acides en utilisant de la chaux et du sulfate de fer.

Principaux bénéfices environnementaux : Rejets d'eaux usées minimales, réduction de la consommation d'eau.

Données opérationnelles :

Caractéristiques en entrée :	
Débit:	35 m ³ /h
Teneur en :	
H ₂ SO ₄	60 g/l
Cu	2100 mg/l
Hg	15 mg/l
As	2 200 mg/l
Pb	2600 mg/l
Ni	7 mg/l
Cd	110 mg/l
Solides en suspension	200 mg/l
Effluents* :	
Débit	31,2 m ³ /h
pH	9,5
Cu	0,2 – 0,5 mg/l
Hg	0,05 mg/l
As	0,1 mg/l
Pb	0,2 mg/l
Ni	0,5 mg/l
Cd	0,1 mg/l
Boue de gypse: - Quantité :	6 – 7 t /h
: - Composition	40 – 50 % d'humidité ~ 30 – 35 % CaSO ₄ ~ 1 % d'As (sous forme de composé d'arsenic) ~ 1 % Cu, ~ 1 – 2 % Fe, ~ 0,01 % Hg, ~ 1 Pb, ~ < 0,1 % Ni, ~ < 0,1 % Cd.

* Les données de conception tiennent compte des variations dans l'effluent.

Tableau 3.31 : Données relatives aux performances en matière de traitement des acides faibles

Effets croisés : Effet positif - Réduction des principaux rejets dans l'eau, réutilisation possible des eaux usées et des boues.

Aspects économiques : Coût de l'équipement : 2,5 millions d'Euros ; coût d'installation : de 4,5 à 5,2 millions d'Euros. Electricité : 200 kW. Lait de chaux (10 %) : 15 m³/h. H₂SO₄ (10 %) : 0,8 m³/h. FeSO₄.7H₂O : 80 kg/h

Applicabilité : La plupart des systèmes de traitement des eaux de procédé.

Exploitations de référence : Projet en construction au sein de l'UE.

Documents de référence : [tm 210, Cu Expert Group 1999]

EXEMPLE 3.10 TRAITEMENT ET RÉUTILISATION DES EAUX USÉES

Description : Système de collecte et de traitement des eaux de surface et des effluents de procédé. Comprend un traitement à base de NaHS suivi par une décantation et un filtrage sur sable. L'eau est réutilisée dans le procédé et pour l'arrosage des parcs de stockage.

Principaux bénéfices environnementaux : Rejets d'eaux usées minimales, réduction de la consommation d'eau.

Données opérationnelles : Réutilisation maximale des eaux usées. 110 000 m³/a rejetés.

Composé	Eau de procédé provenant de la production de cuivre de deuxième fusion après traitement au NaHS, décantation et filtration sur sable
Cu (mg/l)	0,04
Pb (mg/l)	0,04
Ni (mg/l)	0,07
Zn (mg/l)	0,13
As (mg/l)	< 0,01
Cd (mg/l)	0,004
Solides en suspension (mg/l)	1,0

Tableau 3.32 : Données relatives aux performances d'un système de traitement utilisant du NaHS

Effets croisés : - Effet positif - Réduction des principaux rejets dans l'eau, réutilisation des eaux usées.

Aspects économiques : - Non disponibles, mais procédé en exploitation et économiquement viable.

Applicabilité : Réutilisation de l'eau de pluie pour l'humidification des zones de déchets.

Exploitations de référence : - Belgique.

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998].

EXEMPLE 3.11 TRAITEMENT DE L'EAU DE REFROIDISSEMENT

Description: Traitement des purges d'eau de refroidissement direct appliqué à un système de coulée à anode.

Principaux bénéfices environnementaux : Rejets d'eaux usées minimales, réduction de la consommation d'eau.

Données opérationnelles :

Type de traitement	Décantation, ajustement du pH et précipitation	
Eau brute : Quantité :	~ 350 000 m ³ /a	
Principaux composés :	Avant traitement	Dans les effluents
pH		8,5 – 9,5
Cu (mg/l)	< 30	0,01 – 0,25
Pb (mg/l)	< 2,5	0,001 – 0,1
As (mg/l)	< 2,0	0,001 – 0,1
Ni (mg/l)	< 0,5	0,002 – 0,06
Cd (mg/l)	< 0,01	0,0001 – 0,003
Zn (mg/l)	< 1,0	0,02 – 0,5

Tableau 3.33 : Données relatives aux performances d'un système de traitement des rejets d'eau de refroidissement

Effets croisés : - Effet positif - Réduction des principaux rejets dans l'eau.

Aspects économiques : - Non disponibles, mais ce système est exploité et se révèle viable.

Applicabilité : - Réutilisation de l'eau de pluie pour l'humidification des zones de déchets.

Exemples d'usines : - Utilisé dans une usine en Allemagne.

Documents de référence : - [tm 210, Cu Expert Group 1999]

3.3.16 Résidus de procédé

Les techniques disponibles comprenant la récupération des métaux présents dans les résidus et la minimisation des déchets destinés à mise en décharge finale sont des techniques à envisager.

3.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production du cuivre : le SO₂, les poussières, les fumées d'oxydes métalliques, les composés organiques, les eaux usées, les résidus tels que les garnissages de four, les boues, les poussières sous filtre et le laitier. La formation de dioxines pendant le traitement des matériaux de cuivre secondaire constitue également un problème ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend

largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les nouvelles installations peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs dans ce sous-secteur ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

- Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par des matières organiques. Il peut y avoir une ou plusieurs source(s) de matières premières primaires, des matières premières secondaires de qualité variable ou un mélange de matières premières primaires et secondaires.
- Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; par exemple, certains procédés permettent d'éviter tout transfert en poches et sont donc plus faciles à conduire de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux recyclés et permettent donc de minimiser l'impact environnemental en empêchant leur rejet.
- Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé et du système de traitement des effluents est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les matières premières disponibles sur le site et la capacité de traitement de l'installation – ces questions sont donc spécifiques à un site donné. Les procédés primaires capables de fonctionner avec des matières premières secondaires présentent certains avantages.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées par le procédé (par ex., en fusion primaire, certains procédés sont appropriés pour les concentrés « propres », et d'autres pour une charge complexe) ?

- La nature de la charge et des autres métaux qu'elle contient (Pb, Zn, par ex.) a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les émissions associées sont présentées plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

A l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et de techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de capacité de production réalisable et de matériaux pouvant être utilisés ; il existe donc différentes combinaisons possibles. Tous ces procédés maximisent la réutilisation des résidus tout en minimisant les émissions dans le milieu aquatique. Leurs caractéristiques économiques varient. Certains doivent fonctionner à une capacité élevée pour être rentables, tandis que d'autres ne permettent pas de fournir d'importantes capacités de production.

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées dans le Chapitre 2 et dans la section du présent chapitre consacrée aux techniques à envisager lors de la détermination des MTD. Associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un process ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local. Les exemples donnés dans la présente section concernant les techniques à envisager lors de la détermination des MTD indiquent les concentrations associées à certains procédés existants [tm 137 Cu Expert Group 1998].

3.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions tirées pour les meilleures techniques disponibles pour les phases de manutention et de stockage des matériaux sont données dans la section 2.17 du présent document et sont applicables aux matériaux traités dans ce chapitre. Ces techniques sont :

- Utilisation de systèmes de stockage de liquides enfermés derrière des enceintes imperméables d'une capacité au moins égale au volume de la cuve de stockage la plus grande située dans une enceinte. Diverses lignes directrices existent au sein de chaque État membre : elles doivent être appliquées comme prévu. Les zones de stockage doivent être conçues de manière à ce que les fuites apparaissant au niveau des parties supérieures des cuves et au niveau des systèmes de livraison soient interceptées et confinées dans une enceinte. Le contenu des cuves doit être affiché

et des dispositifs d'alarme appropriés doivent être utilisés. Utilisation de livraisons planifiées et de systèmes automatiques de contrôle pour prévenir le remplissage excessif des cuves de stockage.

- L'acide sulfurique et les autres matériaux réactifs doivent également être stockés dans des cuves à double paroi ou dans des cuves placées derrière des enceintes résistantes aux produits chimiques de même capacité. L'utilisation de systèmes de détection de fuite et de dispositifs d'alarme est une mesure raisonnable. En cas de risque de contamination des eaux souterraines, la zone de stockage doit être imperméable et résistante au matériau stocké.
- Les points de livraison doivent se situer dans une enceinte afin de contenir toute dispersion accidentelle de matériau. Un dispositif de ventilation des gaz déplacés vers le véhicule de livraison doit être mise en place afin de réduire les émissions de COV. L'utilisation de dispositifs automatiques de restauration de l'étanchéité des raccordements au niveau de la livraison afin de prévenir les écoulements accidentels doit être envisagée.
- Les matériaux incompatibles (matériaux oxydants et organiques, par exemple) doivent être isolés et des gaz inertes doivent être utilisés pour les cuves ou les aires de stockage, si nécessaire.
- Utilisation de séparateurs d'huile et de matériaux solides, si nécessaire pour l'évacuation des zones de stockage à l'air libre. Stockage des matériaux susceptibles de relarguer de l'huile sur des surfaces bétonnées munies d'enceintes ou autres dispositifs de confinement. Utilisation de méthodes de traitement des effluents adaptées aux produits chimiques stockés.
- Convoyeurs de transport et canalisations placés dans des endroits dégagés et sûrs situés en surface de sorte que les fuites puissent être détectées rapidement et que les dommages causés par les véhicules ou par les autres équipements puissent être évités. Si des canalisations enterrées sont utilisées, leur tracé devra être documenté et faire l'objet d'une signalisation et des systèmes d'excavation sûrs devront être mis en place.
- Utilisation de récipients sous pression robustes et bien conçus pour les gaz (y compris le GPL) munis d'un dispositif de surveillance de la pression des cuves et des conduites de distribution afin de prévenir les ruptures et les fuites. Utilisation de dispositifs de surveillance des gaz en continu dans les espaces confinés et à proximité des cuves de stockage.
- Lorsque cela est nécessaire, utilisation de systèmes de livraison, de stockage et de récupération étanches pour les matériaux pulvérulents et utilisation de silos pour le stockage journalier. Utilisation de bâtiments entièrement fermés pour le stockage des matériaux pulvérulents. Il se peut qu'aucun dispositif de filtration spécial ne soit nécessaire.
- Utilisation d'agents d'étanchéité (mélasse ou PVAL, par exemple) où cela est approprié et compatible, afin de réduire la tendance du matériau à générer des poussières.
- Lorsque cela est nécessaire, utilisation de convoyeurs fermés munis d'un équipement d'extraction et de filtration robuste et bien conçu sur les points de livraison, les silos, les systèmes de transfert pneumatique et les points de transfert du convoyeur afin de prévenir les émissions de poussières.
- Stockage des matériaux non pulvérulents et non solubles sur des surfaces étanches dotés d'un système de collecte et d'évacuation.
- Stockage des copeaux, des tournures et des autres matériaux gras à l'abri afin d'empêcher qu'ils ne soient emportés par les eaux de pluie.
- Utilisation de systèmes de transport rationalisés afin de réduire au maximum la formation et le transport de poussières à l'intérieur d'un site. Les eaux de ruissellement susceptibles d'emporter ces poussières doivent être collectées et traitées avant d'être rejetées.
- Utilisation de dispositifs de lavage des roues et de la carrosserie des véhicules ou d'autres systèmes de nettoyage pour nettoyer les véhicules utilisés pour livrer ou manipuler un matériau pulvérulent. Les conditions locales influenceront la méthode choisie (formation de glace, par exemple). La planification de campagnes de balayage des routes peut être utilisée.

- Mise en place de systèmes de contrôle d'inventaire et d'inspection afin de prévenir les déversements et d'identifier les fuites.
- Intégration de systèmes d'échantillonnage et d'essai des matériaux au système de manutention et de stockage des matériaux afin de déterminer la qualité de la matière première et de prévoir le type de procédé. Ces systèmes doivent être conçus et utilisés selon les mêmes normes élevées que celles applicables aux systèmes de manutention et de stockage.
- Surveillance des zones de stockage destinées aux agents réducteurs (charbon, coke ou copeaux de bois) afin de détecter les incendies dus à une inflammation spontanée.
- Utilisation de bonnes procédures de conception et de construction ainsi que de bonnes procédures d'entretien.

Le tableau récapitulatif relatif à la manutention et au stockage des matériaux est reproduit ci-dessous.

Matière première	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Charbon ou coke	Baies couvertes, silos.	Convoyeurs couverts si non pulvérulent. Pneumatique.		
Combustibles	Cuves ou fûts placés dans un endroit doté d'un système de confinement.	Pipeline sécurisé ou système manuel.		
Fondants si formation de poussières	À l'air libre sur une surface en béton ou équivalent, sols. Stockage dans un endroit fermé (silo) si nécessaire.	Convoyeurs fermés avec dispositif de collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange avec des concentrés ou d'autres matériaux.	
Concentrés	Stockage dans un endroit fermé à moins que les concentrés ne génèrent pas de poussières.	Manutention dans un endroit fermé doté d'un dispositif de collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange au moyen des convoyeurs. Séchage.	
Produits en cuivre – cathodes, fil-machine, billettes et galettes de cuivre	Zone bétonnée à ciel ouvert ou stockage dans un endroit couvert.			
Poussières fines	Stockage dans un endroit fermé.	Manutention dans un endroit fermé doté d'un dispositif de collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange. Agglomération.	
Poussières grossières (matière première ou laitier sous forme de granulés)	Baies couvertes.	chargeur mécanique,.	Déshuilage, si nécessaire.	Dispositif de collecte des huiles, si nécessaire.
Morceaux (matière première ou laitier)	Stockage à ciel ouvert.	chargeur mécanique		Dispositif de collecte des huiles, si nécessaire.
Éléments entiers	Stockage à ciel ouvert ou dans des baies couvertes.	chargeur mécanique.		Dispositif de collecte des huiles, si nécessaire.
Copeaux	Stockage dans un endroit couvert.	Bennes de chargement.	Séchage des copeaux ou déshuilage.	Dispositif de collecte des huiles, si nécessaire.
Câbles	Stockage à ciel ouvert.	chargeur mécanique	Retrait des gaines isolantes.	
Circuits imprimés	Stockage dans des baies couvertes.	chargeur mécanique	Broyage + séparation par densité	La teneur en plastique est susceptible de fournir de la chaleur.
Résidus de procédé à récupérer	Stockage à ciel ouvert, dans des endroits couverts ou fermés selon la génération de poussière.	En fonction des conditions.		Système d'évacuation approprié.
Déchets à mettre en décharge (garnissages de four, par exemple)	Stockage à ciel ouvert ou dans des baies fermées ou étanches (fûts) selon le matériau.	En fonction des conditions.		Système d'évacuation approprié.

Tableau 3.34 : Récapitulatif des techniques de manutention et de stockage utilisées pour le cuivre

3.4.2 Sélection du procédé

Il est impossible de conclure qu'un procédé de production unique peut être appliqué à ce groupe de métaux. Les techniques pour les phases de procédé suivantes sont considérées comme étant les MTD pour les matières premières disponibles.

3.4.2.1 Fusion du cuivre de première fusion

Compte tenu de ces facteurs, les combinaisons suivantes, lorsque des techniques de collecte et de dépollution appropriées sont utilisées, sont considérées comme étant des MTD pour la production de cuivre.

- Les procédés en continu proposés par des fours Mitsubishi et Outokumpu/Kennecott sont considérés comme des MTD pour les phases de fusion et de conversion de la production de cuivre primaire. Alors que le système Outokumpu/Kennecott ne traite actuellement que les matières premières primaires, le système Mitsubishi traite également des matières premières secondaires de cuivre et des déchets, mais peut générer davantage de dioxyde de soufre provenant du four à anode. Ces procédés utilisent des fours étanches, ne dépendent pas d'un transfert en poche de coulée contenant de la matte en fusion et d'autres matériaux et sont donc par nature plus propres. La collecte et le traitement des fumées provenant des phases de granulation et des chenaux de coulée restent une source potentielle tout comme la fusion séparée des déchets (anodiques), lorsque cela est nécessaire. Ces procédés ont différents coûts d'investissement, coûts d'exploitation et capacités nominales et le choix final dépend de conditions locales telles que les matières premières disponibles et la capacité de production désirée.
- Des performances environnementales similaires, à partir de mélanges de concentrés provenant de diverses sources, peuvent être obtenues avec le four de fusion flash Outokumpu. Pour des plus petites productions, les fours ISA Smelt ont fait leurs preuves. Ces fours sont utilisés conjointement avec le convertisseur Peirce-Smith (ou un convertisseur équivalent).
- La combinaison prévoyant un grillage partiel dans un four de grillage sur lit fluidisé, un four électrique de fusion pour matte et un convertisseur Peirce-Smith offre des avantages pour le traitement de charges complexes en permettant la récupération des autres métaux présents dans le concentré (zinc et plomb).
- Utilisation du four à fusion flash Outokumpu pour la fusion directe en cuivre blister en utilisant des concentrés spécifiques ayant une faible teneur en fer ou des concentrés de très grande qualité (à faible production de laitier).

Afin d'obtenir des performances environnementales optimales, la phase de conversion des procédés en discontinu (convertisseur Peirce-Smith (ou équivalent), par exemple) doit utiliser des systèmes avancés de collecte des gaz primaires et secondaires. Les systèmes de hottes de captage doivent être conçus de manière à permettre les transferts en poches de coulée tout en assurant une bonne collecte des fumées. Ce résultat peut être atteint en utilisant un système de contrôle intelligent pour cibler les émissions de fumées automatiquement dès leur apparition pendant le cycle sans forte consommation d'énergie comme c'est le cas avec un fonctionnement en continu. Un exemple est donné dans les techniques à envisager pour la détermination de la MTD. Le cycle de soufflage du convertisseur et le système de collecte des fumées doivent être contrôlés automatiquement afin de prévenir tout soufflage pendant que le convertisseur est retiré. Les matériaux doivent être ajoutés par les hottes ou par les tuyères dans la mesure du possible. Cette combinaison offre potentiellement une plus grande flexibilité, permet l'utilisation de matières premières primaires et secondaires et utilise la chaleur générée par le procédé de conversion pour la fusion des déchets.

Les convertisseurs Noranda et El Teniente et les fours Contop figurant dans la liste des techniques à envisager peuvent également montrer les mêmes performances environnementales que ceux figurant dans la liste ci-dessus. Ils fonctionnent actuellement selon des normes environnementales inférieures, mais avec de bons systèmes de collecte et de dépollution des gaz, ces procédés peuvent offrir des avantages en termes de rendement énergétique, de coûts, de production et de facilité de mise à niveau. Le four flash INCO peut également présenter des avantages mais fonctionne entièrement à l'oxygène, d'où son fonctionnement dans des conditions opératoires étroites.

Les informations disponibles concernant les procédés Baiyin et Vanyucov sont limitées. Pour le moment, il est impossible de les évaluer afin de déterminer leur potentiel à devenir une MTD [tm 137, Copper Expert Group 1998].

Les gaz provenant des procédés de fusion et de conversion du cuivre primaire doivent être traités afin d'éliminer les poussières et les métaux volatils qu'ils contiennent, de récupérer la chaleur ou l'énergie ainsi que le dioxyde de soufre converti en acide sulfurique dans une unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption conçue conformément aux techniques à envisager pour la détermination de la MTD. La production de dioxyde de soufre liquide associée à une installation de contact pour convertir le dioxyde de soufre résiduel en acide est une MTD s'il existe un marché local pour ce matériau.

Technique appliquée	Matières premières	Techniques de dépollution	Commentaires
Fusion flash Outokumpu/convertisseur Peirce-Smith	Concentré et déchets de cuivre	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et d'épuration des fumées. Usines de traitement des eaux.	Concept de four de fusion standard présentant un haut niveau de maturité, de flexibilité et d'excellentes performances environnementales associé à des techniques adéquates de dépollution. Capacités prouvées jusqu'à 370 000 t de cuivre/an.
Grillage partiel/Four électrique/Convertisseur Peirce-Smith	Concentrés normaux et complexes, matériaux secondaires de qualité inférieure, déchets de cuivre.	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et d'épuration des fumées. Usines de traitement des eaux.	Concept de procédé éprouvé, capacité jusqu'à 220 000 t de cuivre/an. Pour la récupération du zinc, le procédé est associé à la vaporisation du laitier.
Procédé en continu Mitsubishi	Concentré et déchets de cuivre.	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	À ce jour, deux installations en fonctionnement et deux de plus en construction. Capacités prouvées jusqu'à 240 000 t de cuivre/an.
Procédé de fusion instantanée et de conversion flash Outokumpu-Kennecott	Concentré	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	Dans cette combinaison, seule une usine alimentée par une charge venant d'une source unique est en fonctionnement. Capacité (convertisseur instantané) ~ 300 000 t de cuivre/an. Une seconde usine sur des bases similaires est en construction.
Four ISA Smelt/Convertisseur Peirce-Smith	Concentré et matériaux secondaires	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	Deux usines en fonctionnement. Capacités prouvées jusqu'à 230 000 t de cuivre/an.
Procédés Noranda et El Teniente/Convertisseur Peirce-Smith	Concentré de cuivre, déchets de cuivre (Noranda)	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	Procédé El Teniente largement utilisé en Amérique du Sud, principalement pour des concentrés venant de sources uniques. Capacités prouvées jusqu'à 190 000 t de cuivre/an.
Procédé Contop/Convertisseur Peirce-Smith	Concentré de cuivre,	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	Une seule usine. Potentiel pour les charges complexes. Capacité atteinte : 120 000 t de cuivre/an.
Procédé Inco Flash/Convertisseur Pierce-Smith	Concentré de cuivre,	Gaz de procédé : unité de production d'acide sulfurique. Techniques de collecte et de traitement des fumées. Usines de traitement des eaux.	Jusqu'à présent, utilisé dans des usines utilisant essentiellement un concentré venant d'une source unique. Capacités prouvées jusqu'à 200 000 t de cuivre/an.

Tableau 3.35 : Fours de fusion de cuivre primaire considérés comme MTD

3.4.2.2 Fusion du cuivre de deuxième fusion

S'agissant de la production de cuivre à partir de matières premières secondaires, les variations au niveau de la charge et le contrôle de la qualité doivent également être pris en compte au niveau local car cela influencera la combinaison de fours, de systèmes de prétraitement et des systèmes de collecte et de dépollution utilisés. Les procédés considérés comme étant des MTD sont les hauts fourneaux, les mini-fours, les fours rotatifs à soufflage par le haut (procédé Top Blown Rotary Converter – TBRC), les fours électriques à arc immergé, les fours ISA Smelt et le convertisseur Peirce-Smith.

Le four électrique à arc immergé est un four étanche. Par conséquent, il est par nature plus propre que les autres, à condition que le système d'extraction des gaz soit d'une conception et de dimensions adéquates. Au moment de la rédaction de ce document, le four électrique est également utilisé pour les matériaux de deuxième fusion contenant du soufre et est associé pendant une telle opération à une unité de production d'acide sulfurique. Le volume de gaz produit se révèle être inférieur à celui des autres fours [tm 92, Cu Expert Group 1998] et la taille du dispositif de dépollution peut par conséquent être réduite.

S'agissant des déchets de cuivre de qualité élevée sans contamination organique, le four réverbère à creuset, le four à cuve à creuset et le procédé Contimelt sont considérés comme des MTD lorsqu'ils sont associés à des systèmes de collecte et de dépollution des gaz adaptés.

3.4.2.3 Conversion du cuivre de première et de deuxième fusion

L'étape de conversion qui peut être utilisée avec ces fours est l'une des techniques figurant dans la liste des techniques à envisager. Si des convertisseurs en discontinu tels que les convertisseurs Peirce-Smith (ou équivalents) sont utilisés, ils doivent être utilisés avec une enceinte totale ou des systèmes efficaces de collecte des fumées primaires et secondaires.

Cela peut être obtenu par l'utilisation d'un système de contrôle intelligent pour cibler les émissions de fumées automatiquement dès leur apparition au cours du cycle sans forte consommation d'énergie générée comme c'est le cas avec un fonctionnement en continu. Un exemple est donné dans la figure 3.13. Le cycle de soufflage du convertisseur et le système de collecte des fumées doivent être contrôlés automatiquement afin d'empêcher tout soufflage pendant que le convertisseur est retiré. Les matériaux doivent être ajoutés par les hottes ou par les tuyères, si possible. Cette combinaison offre potentiellement une plus grande flexibilité, permet l'utilisation de matières premières primaires et secondaires et utilise la chaleur générée par le procédé de conversion de la matte pour les déchets.

Le four ISA Smelt peut être utilisé en mode discontinu. Sont considérés comme MTD : la fusion puis la conversion de la matte en blister ou après fusion secondaire sous atmosphère réductrice, pour l'oxydation du fer et l'élimination du zinc ou de l'étain dans un deuxième temps.

Technique appliquée	Matières premières	Technique de dépollution	Commentaires
Haut fourneau	Matériaux oxydés	Post-combustion, refroidissement* et traitement** des gaz (filtre à manches)	Rendement énergétique élevé. Capacité : normalement 150 – 250 t/j.
Mini-four (totalement fermé)	Matériaux secondaires, dont Fe, Pb et Zn.	Refroidissement et traitement des gaz (filtre à manches)	Intégré au procédé de production de deuxième fusion CRSH
Convertisseur rotatif à soufflage par le haut (CRSH) (totalement fermé)	Matériaux secondaires (de la plupart des qualités)	Refroidissement et traitement des gaz (filtre à manches)	Phase de conversion – CRSH (totalement fermé). Capacité : jusqu'à 70 tonnes par lot.
Four électrique étanche à arc immergé	Matériaux secondaires, dont Sn et Pb (sauf très mauvaise qualité)	Post-combustion, refroidissement et traitement** des gaz	Phase de conversion – Convertisseur Peirce-Smith (avec collecte des fumées primaires et secondaires). Capacité : jusqu'à 25 t/h de capacité de fusion).
Four ISA Smelt (non prouvé pour matériau de qualité inférieure dans une atmosphère réductrice).	Matériaux secondaires (de la plupart des qualités)	Refroidissement* et traitement** des gaz.	Phase de conversion – Convertisseur Peirce-Smith ou Hoboken (avec collecte des fumées primaires et secondaires). Capacité pour un matériau sulfuré : ~ 40 000 t/an.
Four réverbère à creuset	Matériaux secondaires (qualités supérieures). Blister, cuivre noir.	Post-combustion, refroidissement et traitement des gaz (filtre à manches)**	Utilisé pour l'affinage thermique et la fusion des qualités supérieures de matériaux secondaires.
Contimelt	Matériaux secondaires (qualités supérieures). Blister	Post-combustion (four de réduction), WHB et traitement (filtre à manches)**	Utilisé pour la fusion et l'affinage thermique.
Convertisseur de type Peirce-Smith (ou équivalent)	Déchets d'alliage de cuivre, cuivre noir provenant du haut-fourneau	Refroidissement et traitement** des gaz (filtre à manches)	Capacité à séparer les autres métaux par vaporisation. Capacité : 15 – 35 t par lot.
Note. *) Si le niveau de température est suffisamment élevé, la récupération de la chaleur dégagée peut être envisagée. Pour le traitement dans un filtre à manches, un refroidissement supplémentaire est requis. **) Les effluents gazeux peuvent contenir du dioxyde de soufre lors de certaines campagnes, et peuvent être traités dans un laveur ou envoyés dans une unité de production d'acide sulfurique.			

Tableau 3.36 : Fours de fusion de cuivre de deuxième fusion considérés comme MTD

3.4.2.4 Autres procédés et étapes de procédé

L'application de la méthodologie décrite ci-dessus aux autres étapes du procédé amène à la conclusion suivante.

Les autres procédés considérés comme des MTD sont :

- Séchage du concentré, etc., dans un fût à combustion directe et sècheurs instantanés, dans des sècheurs à lit fluidisé ou dans des sècheurs à vapeur.
- Traitement du laitier par four électrique, vaporisation, concassage/broyage et flottation.

- Affinage thermique dans des fours réverbères tournants ou inclinables. Coulée des anodes dans des moules préformés ou au moyen d'une machine de coulée en continu.
- Affinage électrolytique du cuivre au moyen d'une technique de cathode permanente mécanisée ou conventionnelle optimisée.
- Les procédés hydrométallurgiques décrits dans la section 3.1.1.2 sont considérés comme des MTD pour les minerais oxydés et pour les minerais sulfurés de cuivre complexes et ne contenant pas métal précieux. De nouvelles techniques apparaissent rapidement.
- Les procédés utilisés pour la production de fil-machine, de produits semi-finis, etc., au moyen d'un procédé Southwire, Contirod ou Properzi & Secor, d'un procédé de coulée « upcast », d'un procédé de trempage, d'un procédé de coulée en continu et d'autres procédés similaires constituent la base des MTD pour la production de ces matériaux à condition qu'un fort taux de dépollution soit atteint.
- Les procédés utilisés pour la production de lingots, d'étain, etc., décrits comme étant des techniques à envisager constituent la base des MTD pour la production de ces matériaux à condition qu'un fort taux de dépollution soit atteint.

La technique particulière utilisée dépend des matières premières et des autres équipements disponibles dans ou à proximité de l'installation.

3.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les meilleures techniques disponibles applicables aux systèmes de traitement des gaz et des fumées sont celles qui utilisent si possible le refroidissement et la récupération de chaleur avant le traitement. Des filtres à manches utilisant des matériaux modernes hautes performances dans une structure bien conçue et bien entretenue sont applicables. Ils sont munis de systèmes de détection des éclatements de manche et de dispositifs de décolmatage en ligne. Le traitement des gaz pour la phase d'affinage thermique peut inclure une étape d'élimination du dioxyde de soufre et/ou une post-combustion si cela est jugé nécessaire pour éviter des problèmes de qualité de l'air locaux, régionaux ou transfrontaliers.

Les systèmes de collecte des fumées respectent les meilleures pratiques soulignées dans les techniques décrites précédemment dans le présent chapitre et dans la section 2.7. Le problème de la production de fumées par les matières premières secondaires peut être limité grâce au choix du four et des systèmes de dépollution. Certaines matières premières sont contaminées par des matières organiques et peuvent être prétraitées avant la fusion de manière à réduire au maximum la production de fumées.

Les systèmes de captage des fumées utilisés peuvent exploiter des systèmes de maintien de l'étanchéité des fours et peuvent être conçus pour maintenir une dépression adaptée dans le four permettant d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Des systèmes favorisant le maintien de l'étanchéité des fours ou le déploiement des hottes doivent être privilégiés. Exemples : ajout de matériaux par les hottes, ajout de matériaux via des tuyères ou des lances et utilisation de solides vannes rotatives pour les systèmes d'alimentation.

Phase du procédé	Composé des effluents gazeux	Option de dépollution
Manutention des matières premières	Poussières et métaux.	Stockage, manutention et transfert corrects. Collecte des poussières et filtre à manches.
Prétraitement thermique des matières premières	Poussières et métaux. Matières organiques* et monoxyde de carbone.	Prétraitement correct. Collecte des gaz et filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion et refroidissement correct des gaz.
Fusion primaire	Poussières et métaux. Dioxyde de soufre. Hg.	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, traitement des gaz suivi par un refroidissement/traitement final des gaz et unité de production d'acide sulfurique ou récupération du dioxyde de soufre (normalement suivie par un passage dans une unité de production de H ₂ SO ₄). Si la teneur dans la charge est élevée : élimination après traitement du SO ₂ gazeux.
Fusion secondaire	Poussières et métaux. Matières organiques* et monoxyde de carbone. Dioxyde de soufre.**	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, refroidissement et traitement par filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion si nécessaire et refroidissement correct des gaz. Laveur, si nécessaire.
Conversion primaire	Poussières et métaux. Dioxyde de soufre.	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, traitement des gaz suivi par un passage dans une unité de production d'acide sulfurique.
Conversion secondaire	Poussières et vapeurs ou composés métalliques. Matières organiques,* monoxyde de carbone.*** Dioxyde de soufre.**	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, refroidissement et traitement par filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion si nécessaire et refroidissement correct des gaz. Laveur, si nécessaire.
Affinage thermique	Poussières et métaux. Matières organiques,* monoxyde de carbone.**** Dioxyde de soufre.**	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, refroidissement et traitement par filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion (si nécessaire lors du perchage) et refroidissement correct des gaz. Épuration, si nécessaire.
Fusion et coulée	Poussières et métaux. Matières organiques,* monoxyde de carbone.	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, refroidissement et traitement par filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion si nécessaire et refroidissement correct des gaz.
Coulée des anodes et granulation du laitier	Vapeur d'eau	Épuration par voie humide ou dévésiculeur si nécessaire.
Procédés de transformation pyrométallurgique du laitier	Poussières et métaux. Monoxyde de carbone. Dioxyde de soufre.	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz, refroidissement et traitement au moyen d'un filtre à manches. Post-combustion, si nécessaire. Traitement en vue de son élimination.
Note. * Les matières organiques comprennent les COV mentionnés sous les noms de carbone total (hors CO) et dioxines, dont la teneur exacte dépend des matières premières utilisées. ** Du dioxyde de soufre peut être présent si des matières premières ou des combustibles contenant du soufre sont utilisés. Du monoxyde de carbone peut apparaître en cas de mauvaise combustion, en présence de matières organiques ou délibérément afin de réduire la teneur en oxygène. *** Pour les procédés en discontinu, CO uniquement au départ du soufflage **** CO uniquement en l'absence de post-combustion.		

Tableau 3.37 : Récapitulatif des méthodes de dépollution des composés présents dans les effluents gazeux

La collecte des fumées secondaires est coûteuse et consomme beaucoup d'énergie, mais elle est nécessaire dans le cas de certains convertisseurs en discontinu et pour la ventilation des trous de coulée, des chenaux de coulée, etc. L'utilisation d'un système intelligent capable de cibler l'extraction des fumées sur la source et pendant la durée d'une fumée spécifique est plus rentable d'un point de vue énergétique.

Le tableau 3.37 récapitule les options considérées comme étant des MTD pour les procédés de dépollution des composés susceptibles d'être présents dans les effluents gazeux. Certaines variations au niveau des matières premières peuvent influencer la gamme de composés ou l'état physique de certains composants tels que la taille ou les propriétés de la poussière produite. Ces variations doivent être évaluées localement.

3.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions collectées/réduites provenant des diverses sources, plus les émissions fugitives ou non captées provenant de ces mêmes sources. Des systèmes de dépollution modernes et bien utilisés permettent d'éliminer efficacement les agents polluants. Les informations disponibles au moment de la rédaction du présent document indiquent que les émissions fugitives pourraient être le principal contributeur des émissions dans l'air.

- a. S'agissant de la production de cuivre primaire, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :
 - de la réception, du stockage, du mélange et de l'échantillonnage des matériaux.
 - des fours de fusion, de conversion et d'affinage thermique et coulée anodique ainsi que du système de transfert du métal y afférent, et du système de manutention et de traitement des gaz chauds;
 - du four de traitement du laitier et des systèmes de granulation et de manutention du laitier ;
 - des sections de refroidissement et de traitement des gaz humides et de l'unité de production d'acide sulfurique ;
 - de la raffinerie de cuivre électrolytique.
- b. S'agissant de la production de cuivre de deuxième fusion, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :
 - de la réception, du stockage, du mélange et de l'échantillonnage des matériaux ;
 - des fours de fusion, de conversion et d'affinage thermique et de coulée anodique ainsi que du système de transfert du métal y afférent, et du système de manutention et de traitement des gaz chauds;
 - Le système de manutention du laitier.
 - La raffinerie de cuivre électrolytique.
- c. S'agissant de la fabrication de fil-machine de cuivre, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :
 - des fours de fusion, d'affinage (le cas échéant) et de maintien ainsi que du système de manutention et de traitement des gaz chauds y afférent ;
 - de la machine de coulée, du laminoir et des équipements auxiliaires.
- d. S'agissant de la fabrication de produits semi-finis de cuivre et de la production de lingots de cuivre, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :
 - de la réception et du stockage du matériau.
 - des fours de fusion, d'affinage et de maintien/coulée ainsi que du système de manutention et de traitement des gaz chauds et du système de transfert en poches de coulée y afférents.
 - de la machine de coulée, des unités de fabrication et des équipements auxiliaires.

Les émissions fugitives peuvent être très importantes et doivent être évaluées localement. Elles peuvent être prévues à partir du taux d'efficacité de collecte des gaz provenant du four et peuvent être estimées au moyen d'une surveillance (cf. section 2.7).

Les tableaux suivants récapitulent les émissions captées associées à l'utilisation des meilleures techniques disponibles pour les émissions collectées.

polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Effluents gazeux riches en SO ₂ (> 5 %)	Facteur de conversion > 99,7 %	Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption (la teneur en SO ₂ des gaz de queue dépend de la concentration dans les gaz d'entrée). Un dévésiculeur peut être opportun pour l'élimination finale du SO ₂ .	On obtiendra de très faibles niveaux pour les autres polluants atmosphériques, grâce au traitement intensif des gaz avant leur passage dans l'unité de contact (épuration par voie humide, électrofiltre humide et, si nécessaire, élimination du mercure) afin d'assurer la qualité du H ₂ SO ₄ produit.
<p>Note. Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données sous forme de moyenne journalière basée sur une surveillance en continu pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où une surveillance en continu est impossible à mettre en œuvre, la valeur sera la moyenne de la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée. Un facteur de conversion supérieur à 99,9 % a été atteint dans une usine dotée d'une charge constante et élevée en dioxyde de soufre, d'un dispositif de traitement des gaz sophistiqué et d'un refroidissement entre chaque étage.</p>			

Tableau 3.38 : Émissions dans l'air provenant des procédés de fusion et de conversion du cuivre primaire associés à l'utilisation des MTD dans le secteur du cuivre.

Des gaz plus faiblement concentrés peuvent être produits à partir des procédés métallurgiques complexes utilisés pour produire du cuivre, du plomb et des métaux précieux. Des données sont fournies dans les chapitres consacrés au plomb et aux métaux précieux.

polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Brouillards acides	< 50 mg/Nm ³	Dévésiculeur, laveur humide	Un dévésiculeur ou un laveur humide permettra à l'acide capté d'être réutilisé.
COV ou solvants (unité C)	< 5 – 15 mg/Nm ³	Confinement, condensateur, filtre au charbon ou biofiltre.	
<p>Note. Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données sous forme de moyenne journalière basée sur une surveillance en continu pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où une surveillance en continu est impossible à mettre en œuvre, la valeur sera la moyenne de la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température correcte de fonctionnement sera utilisée.</p>			

Tableau 3.39 : Émissions dans l'air provenant des procédés hydrométallurgiques et d'affinage électrolytique associés à l'utilisation des MTD dans le secteur du cuivre.

Les procédés d'affinage électrolytique ne génèrent aucun brouillard acide.

polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches	Les caractéristiques des poussières varient en fonction des matières premières et affectent la valeur atteinte. Des filtres à manches hautes performances permettent d'atteindre de faibles niveaux de métaux lourds. La concentration en métaux lourds est liée à la concentration en poussières et à la proportion de métaux présente dans les poussières.
SO ₂	< 50 – 200 mg/Nm ³	Épuration par voie semi-sèche utilisant un réactif basique et filtre à manches. Laveurs humides basiques ou à utilisant deux réactifs basiques, avec de la chaux, de l'hydroxyde de magnésium, de l'hydroxyde de sodium. Combinaisons de sodium ou de sulfate d'alumine/aluminium en combinaison avec la chaux pour régénérer le réactif et former du gypse.	Les effets croisés potentiels liés à l'utilisation d'énergie, aux eaux usées et aux résidus solides ainsi que la capacité à réutiliser les produits d'épuration influenceront le choix de la technique utilisée.
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 – 300 mg/Nm ³	Brûleur à bas NO _x Brûleur d'oxycombustion	Des valeurs plus élevées sont associées à l'enrichissement en oxygène pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, le volume des gaz et les émissions massiques sont réduites.
Carbone organique total (unité C)	< 5 – 15 mg/Nm ³ < 5 – 50 mg/Nm ³	Post-combustion Combustion optimisée	Prétraitement du matériau secondaire pour éliminer les revêtements organiques, si nécessaire.
Dioxines	< 0,1 – 0,5 ng TEQ/Nm ³	Système d'élimination des poussières à haute efficacité (filtre à manches, par exemple), post-combustion suivie d'un refroidissement rapide.	D'autres techniques sont disponibles (adsorption sur charbon actif : filtre de charbon ou injection de chaux/carbone). Le traitement d'un gaz dépoussiéré propre est nécessaire pour atteindre de faibles niveaux.

Note. Émissions collectées uniquement.

Les émissions associées sont données sous forme de moyennes journalières basées sur une surveillance en continu durant la période de fonctionnement. Dans les cas où une surveillance en continu ne peut être mise en œuvre, la valeur sera la moyenne de la période d'échantillonnage.

S'agissant du système de dépollution utilisé, les caractéristiques des gaz et des poussières seront pris en compte dans la conception du système et une température correcte de fonctionnement sera utilisée. S'agissant de l'élimination du SO₂ ou du carbone total, la variation de la concentration en gaz brut pendant les procédés en discontinu pourront affecter les performances du système de dépollution. Par exemple, les « souffles » du convertisseur produiront des pics de concentration dans le gaz brut et, par conséquent, le nombre de cycles par jour influencera la plage de valeurs associée (exprimée sous forme de moyenne journalière). Un effet similaire peut être constaté avec d'autres phases de procédé en discontinu. Des pics de concentrations dans le gaz traité pourront atteindre jusqu'à 3 fois la moyenne mentionnée. S'agissant des NO_x, l'utilisation de procédés à haute efficacité (Contimelt, par exemple) requiert qu'un équilibre soit atteint localement entre la consommation d'énergie et la valeur obtenue.

Tableau 3.40 : Émissions dans l'air provenant de la fusion et de la conversion secondaires, de l'affinage thermique primaire et secondaire, de la fusion et du traitement du laitier en four électrique associés à l'utilisation des MTD dans le secteur du cuivre.

polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches avec injection de chaux (pour la collecte du SO ₂ /la protection du filtre).	Une remise en circulation des poussières peut être utilisée pour la protection du tissu/le captage des fines particules. Les concentrations en métaux lourds sont liées aux concentrations en poussières et à la proportion de métaux présente dans les poussières.
SO ₂	< 500 mg/ Nm ³ < 50 – 200 mg/ Nm ³	Filtre à manches avec injection de chaux sèche dans un gaz froid. Épurateur par voie humide alcaline pour le captage du SO ₂ présent dans les gaz chauds (provenant des gaz du sécheur après élimination des poussières).	L'utilisation de systèmes d'épuration par voie humide ou semi-sèche avec un gaz froid implique des effets croisés potentiellement significatifs.
Dioxines	< 0,1 – 0,5 ng TEQ/Nm ³	Filtre à manches avec injection de chaux pour la protection du filtre.	Le traitement d'un gaz dépoussiéré propre est nécessaire pour atteindre de faibles niveaux.
Note. Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données sous forme de moyennes journalières basées sur une surveillance en continu durant la période de fonctionnement. Dans les cas où une surveillance en continu ne peut être mise en œuvre, la valeur sera la moyenne de la période d'échantillonnage. S'agissant du système de dépollution utilisé, les caractéristiques des gaz et des poussières seront pris en compte dans la conception du système et une température correcte de fonctionnement sera utilisée.			

Tableau 3.41 : Émissions dans l'air provenant des systèmes secondaires de collecte des fumées et des procédés de séchage associés à l'utilisation des MTD dans le secteur du cuivre.

La teneur en métal des poussières varie considérablement d'un procédé à l'autre. En outre, pour des fours similaires, on constate des variations significatives concernant la teneur en métal. Ces variations sont dues à l'utilisation de différentes matières premières et à l'utilisation des fours pour isoler les éléments mineurs en vue de leur collecte ultérieure et de leur enrichissement à des fins de traitement supplémentaire. Une description détaillée dans ce document des concentrations réalisables spécifiques pour tous les métaux rejetés dans l'air manquerait donc de précision.

Ce problème est spécifique à chaque site. Toutefois, le tableau suivant donne un certain nombre d'indications concernant les effets sur les teneurs en métaux des poussières qui seront rencontrées localement.

Composé	Poussières de l'électrofiltre du four de fusion du concentré pour matte	Poussières de haut-fourneau	Poussières du convertisseur de déchets	Poussières de l'électrofiltre du convertisseur de matte	Poussières du four électrique de traitement du laitier	Poussières de four à anode
Pb (%)	0,1 – 5	5 – 40	5 – 30	2 – 25	2 – 15	2 – 20
Zn (%)	0,1 – 10	20 – 60	25 – 70	5 – 70	25 – 60	5 – 40
Sn (%)	0,1 – 1	0,2 – 5	1 – 20	0,1 – 4		
Cu (%)	5 – 30	2 – 12	2 – 15	10 – 25	0,5 – 2,5	15 – 25
As (%)	0,1 – 4					0,5 – 10

Ni (%)	0,1 - 1	0,1 - 1		0,1 - 1		
--------	---------	---------	--	---------	--	--

Tableau 3.42 : Teneur en métal de certaines poussières provenant de divers procédés de production de cuivre

Certains métaux contiennent des composés toxiques qui peuvent être produits par les procédés. Ils doivent donc être réduits afin de se conformer aux normes spécifiques locales, régionales ou transfrontalières en matière de qualité de l'air. On considère que de faibles concentrations en métaux lourds sont associées à l'utilisation de systèmes de dépollution modernes hautes performances tels que le filtre à manches à membrane à condition que la température de fonctionnement soit correcte et que les caractéristiques des gaz et des poussières soient prises en compte lors de leur conception.

3.4.4 Eaux usées

C'est un problème spécifique à chaque site. Les systèmes de traitement existants sont de bonne facture. La totalité des eaux usées doivent être traitées de manière à éliminer les matières solides et les huiles/goudrons. Les gaz acides absorbés (dioxyde de soufre, HCl, par exemple) devraient, si possible, être réutilisés ou neutralisés si nécessaire. Les sources des émissions dans l'eau sont :

- e. S'agissant du cuivre primaire et de deuxième fusion, la quantité totale d'émissions dans l'eau est basée sur :
 - Le système de traitement ou de granulation du laitier.
 - Le raffinage électrolytique de cuivre et notamment le circuit de purification de l'électrolyte et la section de lixiviation de la boue anodique.
 - Le système de traitement des eaux usées et des eaux de ruissellement.
 - L'acide sulfurique faible provenant du refroidissement et du traitement des gaz de SO₂ en combinaison avec le traitement des eaux usées.
- f. S'agissant de la production de fil-machine, de produits semi-finis et de lingots de cuivre, la quantité totale d'émissions dans l'eau est basée sur :
 - Le système de traitement des eaux.

Des exemples de traitement des eaux usées appliqués dans plusieurs procédés sont donnés dans la section consacré aux techniques à envisager lors de la détermination des MTD ci-dessus. S'agissant des eaux usées de procédé, ces exemples comprennent un traitement au moyen de précipitants d'hydroxyde ou de sulfures selon le métal contenu suivi par une sédimentation et, si nécessaire, une filtration. Les exemples indiquent les concentrations associées à ces procédés. Les performances associées au traitement correct des eaux usées sont indiquées ci-dessous.

	Principaux composés [mg/l]					
	Cu	Pb	As	Ni	Cd	Zn
Eau de procédé ou eau de refroidissement direct	< 0,1	< 0,05	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,15
Note : Les émissions associées à l'eau sont basées sur un échantillon aléatoire qualifié ou à un échantillon composite sur 24 heures. La portée du traitement des eaux usées dépend de la source et des métaux contenus dans les eaux usées.						

Tableau 3.43 : Plages de concentration en métaux associées d'un ensemble de flux d'eaux usées provenant de la production de cuivre

3.4.5 Résidus de procédé

L'utilisation ou le recyclage des laitiers, des boues et des poussières sous filtre est considéré comme faisant partie des procédés. Les procédés de production dans ce secteur ont été développés par l'industrie pour optimiser la réutilisation de la majorité des résidus de procédé issus des unités de production ou pour produire des résidus destinés à enrichir des éléments mineurs sous une forme qui permette leur utilisation dans des procédés de production d'autres métaux non ferreux.

Source du procédé	Produit intermédiaire, sous-produit, résidu	Utilisation finale
Systèmes de dépollution	Poussières sous filtre Composés de mercure Catalyseurs et acides usagés Boues d'acide sulfurique Acide faible	Matière première pour le Cu (renvoyée dans le four de fusion), Pb, Zn et autres métaux. Matière première pour le Hg. Industrie chimique. Boue de neutralisation à éliminer. Décomposition pour la récupération du SO ₂ , la neutralisation (boues à éliminer) ou d'autres utilisations (support de lixiviation, par exemple).
Four de fusion	Laitier Garnissages de four	Envoyé vers un four à laitier ou vers un autre procédé de séparation – recyclage interne. Récupérés ou mis en décharge.
Convertisseur	Laitier	Envoyé vers le four de fusion – recyclage interne.
Four à laitier	Laitier	Abrasif, matériau de construction
Four d'affinage (à anode)	Laitier	Envoyé vers le four de fusion – recyclage interne.
Hall d'électrolyse	Prélèvements d'électrolyte	Récupération des sels de Ni et du Cu, récupération de l'acide et autres utilisations.
Fusion	Résidus d'écémage et laitier	Matière première pour la récupération du métal
Général	Huiles	Récupération de l'huile
Hydrométallurgie	Électrolyte usagé	Lixiviation
Fabrication de produits semi-finis	Solutions de décapage à l'acide et solutions de rinçage.	Mise en décharge sous forme de déchet si faible teneur en métaux non-ferreux ou vendues pour la récupération des métaux.
Production de barres	Solutions de décapage à l'acide (le cas échéant)	Récupération dans une cuve d'électrolyse séparée.

Tableau 3.44 : Utilisations potentielles des produits intermédiaires, des sous-produits et des résidus issus de la production du cuivre

La quantité de résidus et de sous-produits obtenue dépend grandement des matières premières et notamment de la teneur en fer des matériaux primaires, de la teneur en autres métaux non ferreux des matériaux primaires et secondaires et de la présence d'autres composés tels que la silice, etc. Par conséquent, les émissions dans le sol dépendent grandement d'un site et d'un matériau donnés ainsi

que de facteurs abordés précédemment. Il est donc impossible de créer un tableau-type réaliste des quantités associées à l'utilisation des MTD sans détailler les spécifications des matières premières. Ce travail ne peut être fait que localement. Les principes des MTD incluent la prévention et la minimisation des déchets et la réutilisation des résidus à chaque fois que cela est possible. Le tableau ci-dessus donne un aperçu de l'utilisation potentielle des résidus issus des procédés utilisés pour produire du cuivre. La liste n'est pas exhaustive et, en outre, certaines options peuvent ne pas être disponibles en raison de l'absence d'installations adaptées.

3.4.6 Coûts associés à ces techniques

Les données relatives aux coûts ont été compilées pour toute une gamme de variantes de procédés et de systèmes de dépollution. Les données relatives aux coûts sont spécifiques à chaque site et dépendent d'un certain nombre de facteurs. Toutefois, les ordres de grandeur donnés peuvent permettre d'effectuer des comparaisons. Les données sont fournies dans une annexe à cette note de manière à pouvoir comparer les procédés et les systèmes de dépollution pour l'ensemble de l'industrie des métaux non ferreux.

3.5 Technologies émergentes

- On a constaté [tm 137 Cu Expert Group 1999] qu'une activité de développement se mettait en place dans le domaine du développement et de l'amélioration des techniques de bain en fusion. Ces dernières peuvent fournir des installations à faible coût en raison des taux de réaction potentiels élevés dans les installations modernes lorsqu'elles sont associées à des fours étanches ou semi-étanches. La fiabilité des usines doit être améliorée à long terme et des données provenant de certaines installations chinoises et russes utilisant des fours Baiyin ou Vanyucov devront être étudiées dès qu'elles seront disponibles.

Technique	Commentaires
Fusion/conversion en continu : combinaison réacteur Noranda et four de conversion Mitsubishi	Résultats de la mise en service de 1999 en attente d'évaluation.
Convertisseur Noranda en continu	Résultats de la mise en service en attente d'évaluation.

Tableau 3.45 : Technique émergente en matière de four de bain en fusion

- L'utilisation du four ISA Smelt pour la réduction/oxydation n'est pas industriellement prouvée mais est émergente.
- L'utilisation de procédés hydrométallurgiques est également émergente. Ils conviennent pour les minerais mixtes oxydés / sulfurés contenant de faibles concentrations en métaux précieux. Des bactéries oxydant le fer et les sulfures peuvent être utilisées pour faciliter la lixiviation. Certains procédés sont en train d'être développés pour le traitement des concentrés et de la poussière basé sur la lixiviation : procédés de lixiviation, d'extraction par solvant, d'extraction électrolytique (L: SX:EW), par exemple. [tm 137, Cu Expert Group 1999; tm 56, Kojo 1998].

Des développements dans d'autres secteurs industriels peuvent aussi être considérés comme émergents pour les procédés de production de cuivre. Les développements spécifiques sont les suivants :

- L'utilisation de tissus modernes pour les filtres à manches implique des tissus (et la conception de leur structure) plus efficaces et plus résistants qui permettent simultanément d'augmenter considérablement la durée de vie du filtre, d'améliorer ses performances et de réduire les coûts.
- Les émissions fugitives peuvent être collectées de différentes manières. L'utilisation de commandes intelligentes peut améliorer la collecte des fumées et réduire la taille des ventilateurs et, par là même, les coûts. Des wagonnets ou des bennes de chargement étanches sont utilisés avec un four réverbère dans un site de production secondaire d'aluminium et réduit considérablement la quantité d'émissions fugitives rejetée dans l'atmosphère en confinant les émissions durant le chargement.

4 PROCEDES UTILISES POUR PRODUIRE DE L'ALUMINIUM À PARTIR DE MATIERES PREMIERES PRIMAIRES ET SECONDAIRES

4.1 Procédés et techniques appliqués

4.1.1 Aluminium primaire

4.1.1.1 Production d'alumine

L'alumine est produite à partir de la bauxite grâce au procédé Bayer désormais bien implanté. Ce procédé est normalement réalisé à proximité du site d'extraction minière, mais il existe des sites en Europe où la bauxite est transformée en alumine sur le même site qu'une fonderie d'aluminium ou dans des affineries d'alumine autonomes.

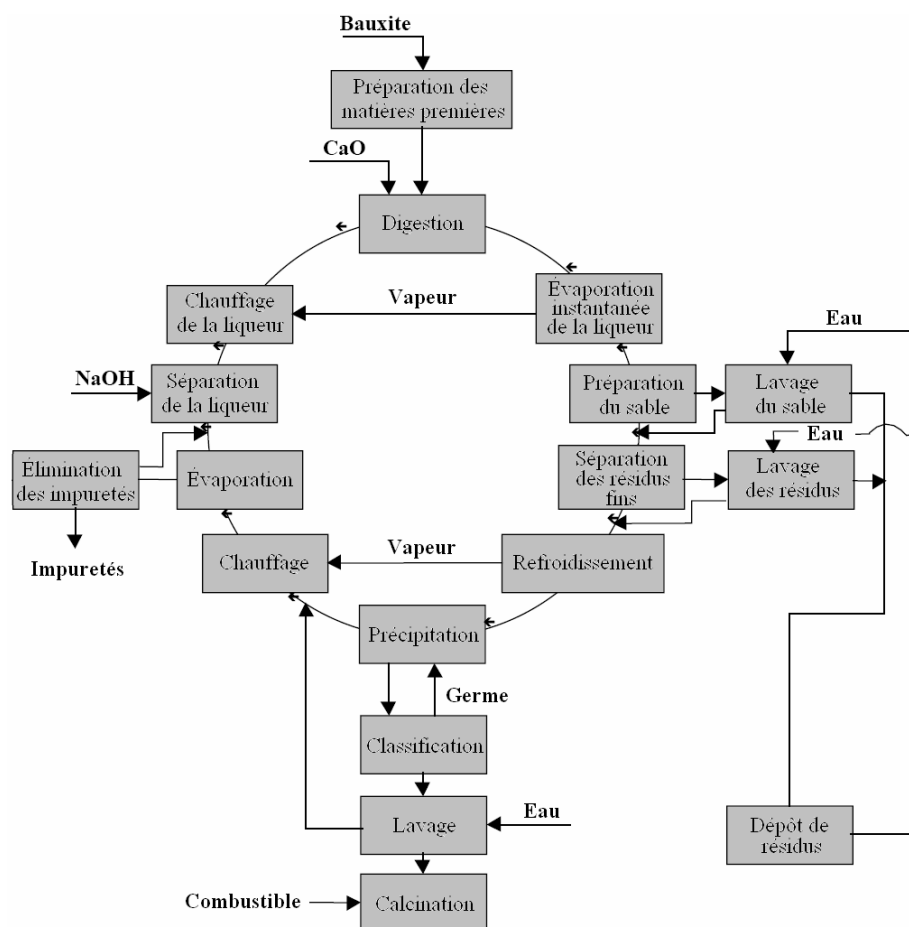


Figure 4.1 : Production de l'alumine – Procédé Bayer

Globalement, le procédé est standard pour tous les sites et utilise de la soude caustique pour extraire l'alumine à partir de la bauxite à des températures et à des pressions élevées dans des autoclaves. Une boue contenant de l'aluminate de sodium dissoute et un mélange d'oxydes métalliques (appelé boue rouge) est produite par le procédé puis éliminée dans des épaisseurs. La solution d'aluminate est refroidie et de l'alumine est ajoutée pour amorcer la réaction afin de cristalliser l'alumine hydratée [tm 30, Irish EPA 1996]. Les cristaux sont lavés, puis calcinés dans des fours tournants ou dans des fours de calcination à lit fluidisé/fours de calcination flash fluidisés avant utilisation ou expédition [tm 77,

Al Expert Group 1998; tm 90 Al Expert Group 1998]. D'autres métaux tels que le vanadium peuvent être présents et peuvent également être extraits de la solution.

Bien que le procédé de base soit standard dans toute l'industrie, il existe des variantes concernant l'équipement utilisé, et notamment au niveau des autoclaves et des fours de calcination. Ces variantes affectent principalement l'énergie utilisée dans le procédé [tm 77, Al Expert Group 1998]. Ce point sera traité plus loin.

4.1.1.2 Production d'aluminium par électrolyse

L'aluminium est produit à partir de matériaux primaires par réduction électrolytique de l'oxyde d'aluminium (alumine) dissout dans un bain fondu essentiellement composé d'un fluorure double d'aluminium et de sodium (cryolithe) à une température d'environ 960 °C [tm 6, HMIP Al 1993 ; tm 100, NL Al 1998].

Les cuves d'électrolyse comportent une cathode en carbone, isolée par des briques réfractaires situées à l'intérieur d'un caisson rectangulaire en acier, et une anode en carbone suspendue à un cadre anodique conducteur. Les cuves sont reliées en série afin de constituer une ligne de réduction électrique (série de cuves). Un courant continu part de l'anode en carbone et traverse le bain pour parvenir à la cathode et de là, par l'intermédiaire d'une barre omnibus, passe à la cuve suivante [tm 6, HMIP Al 1993 ; tm 100, NL Al 1998].

De l'alumine est ajoutée dans les cuves afin de maintenir une teneur en alumine de 2 à 6 % dans le bain fondu. Les ajouts de matériau réalisés dans les installations modernes sont contrôlés par ordinateur. Des composés fluorés sont ajoutés afin d'abaisser le point de fusion du bain, ce qui permet aux cuves de fonctionner à une température plus basse. Le fluorure d'aluminium (AlF_3), l'additif le plus couramment utilisé, neutralise également l'oxyde de sodium présent sous forme d'impureté dans la charge d'alumine. La plupart des cuves fonctionnent désormais avec l' AlF_3 présent dans le bain et fortement excédentaire par rapport à la composition stœchiométrique de la cryolithe. Toutefois, les émissions de fluorures augmentent au fur et à mesure que la quantité d' AlF_3 en excès dans le bain augmente [tm 6, HMIP Al 1993 ; tm 77 Al Expert Group 1998 ; tm 100, NL Al 1998].

De l'aluminium liquide est déposé au niveau de la cathode au fond de la cuve et l'oxygène se combine avec l'anode en carbone pour former du dioxyde de carbone. Les anodes en carbone sont par conséquent consommées en continu pendant le procédé.

Les systèmes de cuves varient en fonction du type d'anode et de la méthode utilisée pour charger l'alumine, tel qu'illustré dans la Figure 4.2 [tm 6 et 17, HMIP Al 1993 ; tm 100, NL Al 1998]. Il existe deux grands types de cuves d'électrolyse : les anodes Søderberg et les anodes précuites.

a) Les anodes Søderberg sont fabriquées in situ à partir d'une pâte de coke de pétrole calciné et de brai de houille cuite par la chaleur dégagée par le bain fondu. Du courant est envoyé dans l'anode Søderberg au moyen de goujons qui sont retirés et remplacés plus haut sur l'anode au fur et à mesure de la consommation de cette dernière. Au fur et à mesure de la consommation de l'anode, davantage de pâte descend dans la gaine de l'anode ; ainsi, avec ce procédé, il est inutile de remplacer les anodes. De l'alumine est ajoutée périodiquement aux cuves à anode Søderberg au moyen d'orifices pratiqués en cassant la croûte formée par l'alumine et l'électrolyte congelés qui recouvre le bain fondu. Les installations modernes utilisent des systèmes automatiques de points d'alimentation, il n'est ainsi plus nécessaire de casser régulièrement la croûte. Une jupe est fixée sur la partie inférieure de la gaine de l'anode pour collecter les gaz. Les fumées sont captées et consommées dans des brûleurs afin de réduire les émissions de goudrons et de HAP. Les gaz de ventilation du hall d'électrolyse peuvent également être captés et traités.

b) Les anodes précuites sont fabriquées à partir d'un mélange de coke de pétrole calciné et de brai de houille. Elles sont mises en forme en blocs et cuites dans une usine de fabrication d'anodes séparée. Cette dernière est souvent intégrée à l'usine d'aluminium de première fusion et doit être incluse dans la définition de ces installations, de même que la contribution de la production d'anodes à la quantité totale d'émissions. Le Chapitre 12, carbone et graphite, couvre ce procédé plus en détail. Les anodes

sont suspendues dans les cuves par des tiges fixées aux poutres anodiques qui servent également de conducteur électrique. Les anodes descendent progressivement au fur et à mesure qu'elles sont consommées et sont remplacées avant que les pattes métallique scellée dans l'anode ne soient attaquées par le bain fondu. Les restes d'anodes, appelés mégots d'anode, sont débarrassés du matériau de fusion et recyclés dans l'unité de production d'anodes.

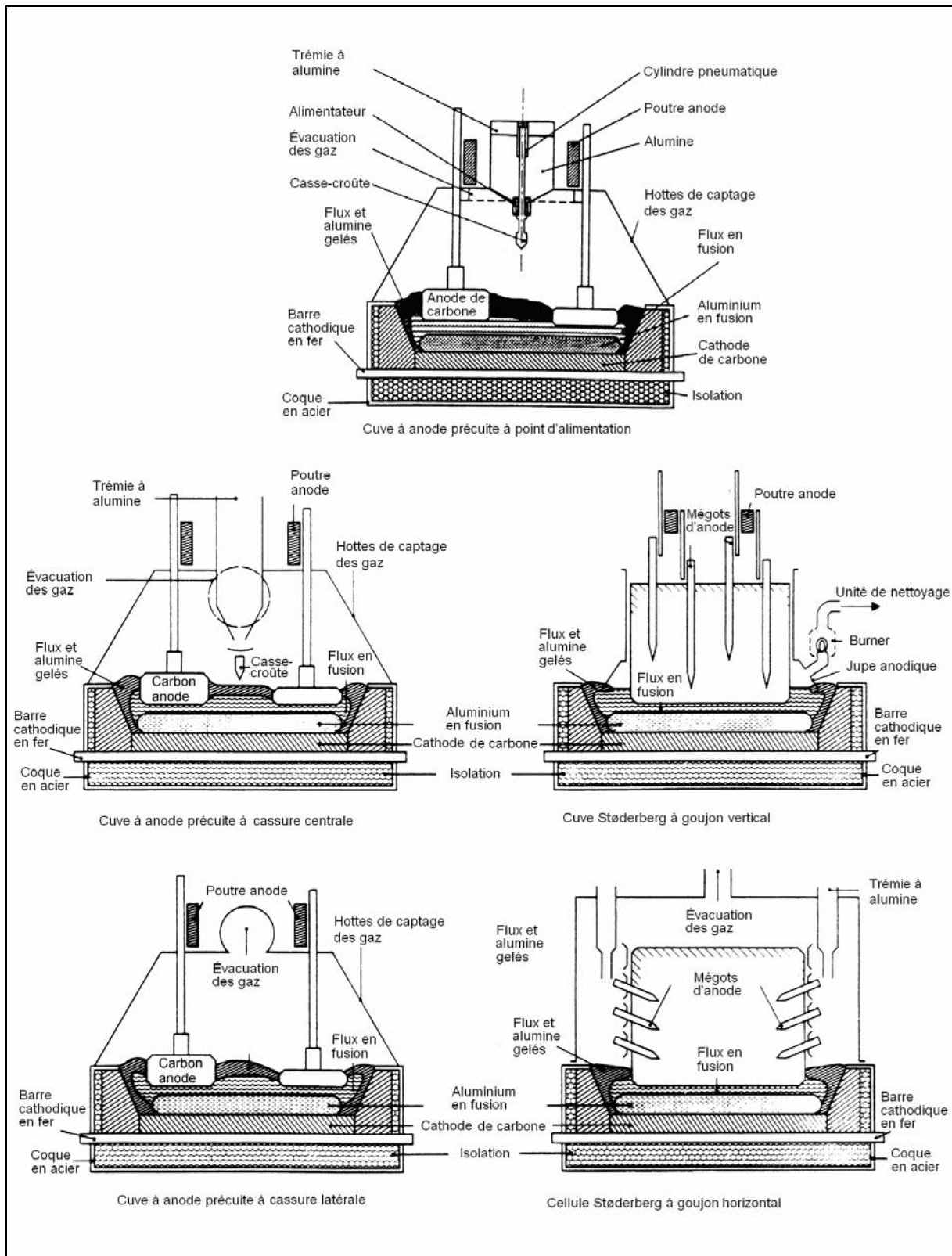


Figure 4.2 : Cuves d'électrolyse utilisées pour la production d'aluminium

Les cuves à anodes précuites comportent généralement de 12 à 40 anodes individuelles qui sont changées à intervalles réguliers. Dans un grand hall d'électrolyse, on procède souvent au remplacement des anodes, ce qui implique l'ouverture des capots de protection des cuves. Bien qu'il ne se produise que peu de fuites venant des cuves en opération (cela dépend de l'efficacité du système d'extraction), le taux d'extraction global des autres cuves est réduit. Cela entraîne une augmentation des émissions fugitives si plusieurs couvercles sont ouverts simultanément.

Les cuves à anodes précuites peuvent être de deux types selon la manière dont l'alumine est ajoutée.

Les cuves à anodes précuites à piquage latéral (SWPB) sont chargées en alumine après que la croûte a été cassée à la périphérie de la cuve. Les hottes de captage des gaz disposées sur toute la longueur des cuves doivent être ouvertes pendant cette opération.

Les cuves à anodes précuites à piquage central (CWPB) sont chargées en alumine après que la croûte a été cassée le long de la ligne centrale ou à des endroits précis de la ligne centrale de la cuve (équipée de piqueurs-doseurs). Ces méthodes d'alimentation peuvent être mises en œuvre sans ouvrir les hottes de captage des gaz.

Le système de collecte des gaz extrait les gaz de procédé pour les envoyer vers un système de dépollution qui utilise des épurateurs à alumine par voie sèche pour éliminer et récupérer le HF et les fluorures. L'épurateur élimine également les goudrons résiduels, mais ne supprime pas le dioxyde de soufre. L'alumine quittant les épurateurs est éliminée dans des filtres à manches ou dans des filtres électrostatiques et est habituellement chargée directement dans les cuves. Les gaz de ventilation du hall d'électrolyse peuvent aussi être captés et traités dans un système d'épuration par voie humide.

La cathode n'est pas consommée dans le procédé, mais les cathodes se détériorent avec le temps. Les blocs de carbone absorbent l'électrolyte et, au bout de 5 à 8 ans, doivent être remplacés en raison du gonflement et des fissures qui entraînent la pénétration de l'électrolyte liquide et d'aluminium dans la barre conductrice de la cathode et dans le caisson en acier. De petites quantités de cyanures se forment à la suite d'une réaction entre l'azote et le carbone. Les résidus cathodiques sont appelés des garnisages de cuve usagés. Plusieurs méthodes existent pour les éliminer et les recycler [tm 42, Ausmelt 1998; tm 77 Al Expert Group 1998 ; tm 100, NL Al 1998]. Celles-ci sont décrites plus loin dans la section 4.2.1.4.

De l'aluminium en fusion est périodiquement aspiré des cuves au moyen d'un siphon à dépression et versé dans des poches de transport. Ces poches sont acheminées vers l'atelier de coulée et l'aluminium est versé dans des fours de maintien chauffés. Des ajouts d'éléments d'alliage sont effectués dans ces fours et la température est contrôlée. Les résidus d'écémage formés à la suite de l'oxydation de l'aluminium en fusion à la surface du bain sont écémés. Des conteneurs étanches peuvent être utilisés pour réduire au maximum tout risque d'oxydation ultérieure des résidus d'écémage. L'utilisation d'azote ou d'argon est également utilisée comme gaz d'inertage [tm 106, Farrell 1998].

Tout au long de ce chapitre, le terme résidus d'écémage désigne à la fois les résidus d'écémage et les crasses.

4.1.1.3 Affinage

Le métal est affiné lors de cette étape afin d'en éliminer les impuretés telles que le sodium, le magnésium, les particules d'oxyde de calcium et l'hydrogène. Cette phase d'affinage est réalisée par injection d'un gaz dans le métal en fusion, généralement dans un réacteur en ligne. Le gaz de traitement utilisé varie en fonction des impuretés : de l'argon ou de l'azote est utilisé pour éliminer l'hydrogène et un mélange de chlore et d'argon ou d'azote est utilisé pour éliminer les impuretés métalliques. Du fluorure d'aluminium est également utilisé pour éliminer le magnésium. Le métal est alors filtré avant la coulée solidification.

Des ajustements d'éléments d'alliage sont également effectués dans le four de maintien par ajout du métal requis (Si, Cu, Mg, Pb, Sn, Zn) ou d'un alliage mère du métal avec l'aluminium (Ti, Cr, Fe, Mn, Ni) [tm 116, Secondary Al Expert Group 1998].

D'autres additifs sont également utilisés pour affiner le grain de métal : le titane ou le borure de titane sont les plus couramment utilisés.

Des résidus d'écémage apparaissent à ce stade. Ils sont éliminés de la surface du métal en fusion et sont recyclés par l'industrie de l'aluminium de deuxième fusion.

4.1.1.4 Coulée

Des plaques de laminage, des lingots T ou des billettes sont coulés dans des machines de coulée semi-continue verticale qui utilisent des lingotières métalliques refroidies à l'eau et un plateau de retenue au niveau de la partie inférieure des moules. Le plateau descend au fur et à mesure que le lingot se forme. D'autres méthodes de coulée comprennent l'utilisation de moules métalliques (statiques ou constamment en mouvement) et la coulée en continu de bandes minces et la coulée en continu de fil-machine [tm 6, HMIP Al 1993]. De petites quantités supplémentaires de résidus d'écémage apparaissent également lors de cette opération ; ils sont éliminés de la surface du métal en fusion.

4.1.2 Aluminium de deuxième fusion

4.1.2.1 Procédés de production

La principale caractéristique de la production d'aluminium de deuxième fusion est la diversité des matières premières rencontrées et des fours utilisés [tm 116, ALFED 1998]. Ainsi, les types de matières premières et leur prétraitement sont utilisés pour déterminer le type de four qui conviendra le mieux à un type particulier de déchets, à leur taille, à leur teneur en oxydes et à leur degré de contamination, entre autres [tm 145, Winter 1998]. Ces facteurs influencent également le choix des fondants associés au procédé afin d'optimiser la récupération de l'aluminium [tm 2, HMIP Al 1993 ; tm 77 et 116, ALFED 1998]. Le choix du procédé utilisé variera d'une usine à l'autre. Le nombre de facteurs ayant un impact sur le choix du procédé fait que plusieurs stratégies viables peuvent convenir dans des circonstances similaires.

Des fours tournants ou des fours réverbères sont utilisés pour fondre une vaste gamme de matières secondaires. Les fours tournants peuvent être équipés d'un mécanisme d'inclinaison et il a été rapporté que ceci réduit la quantité de fondant requise [tm 145, Winter 1998]. Les fours à induction et le procédé Meltower sont utilisés pour fondre l'aluminium de pureté plus élevée. Les fours réverbères comprennent souvent un bassin latéral. Un système de brassage (mécanique ou électromagnétique) est parfois utilisé pour acheminer le métal en fusion au travers du bassin latéral et un bassin de chargement pour faciliter la fusion des petites particules. Les pompes électromagnétiques ne comportent aucune pièce mobile et tirent leur force électromagnétique d'une bobine externe. Le bassin de chargement et le four sont équipés d'un dispositif d'agitation induit. D'autres pompes dotées de pièces internes résistantes à la chaleur et des « pales rotatives » en métal sont également utilisés [tm 145, Winter 1998].

Les fours réverbères peuvent également utiliser une sole inclinée au niveau de la zone de chargement en métal où des pièces contenant de grands morceaux de ferraille peuvent être placées. L'aluminium est séparé par fusion du substrat de fer qui reste sur la sole. La contamination du bain par le fer est par conséquent réduite au maximum [tm 77, Al Expert Group 1998 ; tm 116, ALFED 1998]. Une description détaillée de certains de ces fours est donnée dans la section 2.5.2.

Les sources typiques de déchets d'aluminium sont les déchets de procédé, les cannettes de boisson usagées (CBU), les feuilles minces, les extrusions, les déchets commerciaux, les tournures et les vieux métaux laminés ou coulés. En outre, de l'aluminium est également récupéré à partir des résidus d'écémage et des laitiers salés. Divers contaminants peuvent être présents et sont pris en compte dans

le choix du prétraitement ou du modèle de four [tm 77, Al Expert Group]. Les déchets sont parfois préalablement triés par types d'alliage afin de produire l'alliage désiré avec le minimum de transformation métallurgique supplémentaire [tm 116, ALFED 1998 ; tm 121, Hoogovens 1998].

Les déchets tels que les cannettes de boisson usagées et les tournures sont les principales sources de matériau chargés et peuvent être contaminés. Ils est parfois nécessaire de les débarrasser de leur revêtement ou de les déshuiler avant la fusion afin d'améliorer le taux de fusion (et le rendement thermique) et de réduire le risque d'émissions [tm 121, Hoogovens 1998 ; tm 122, ETSU 1998]. La fusion de matériaux propres peut permettre d'économiser de l'énergie et de réduire la formation de résidus d'écumage. Les procédés de prétraitement sont décrits dans le tableau 4.24.

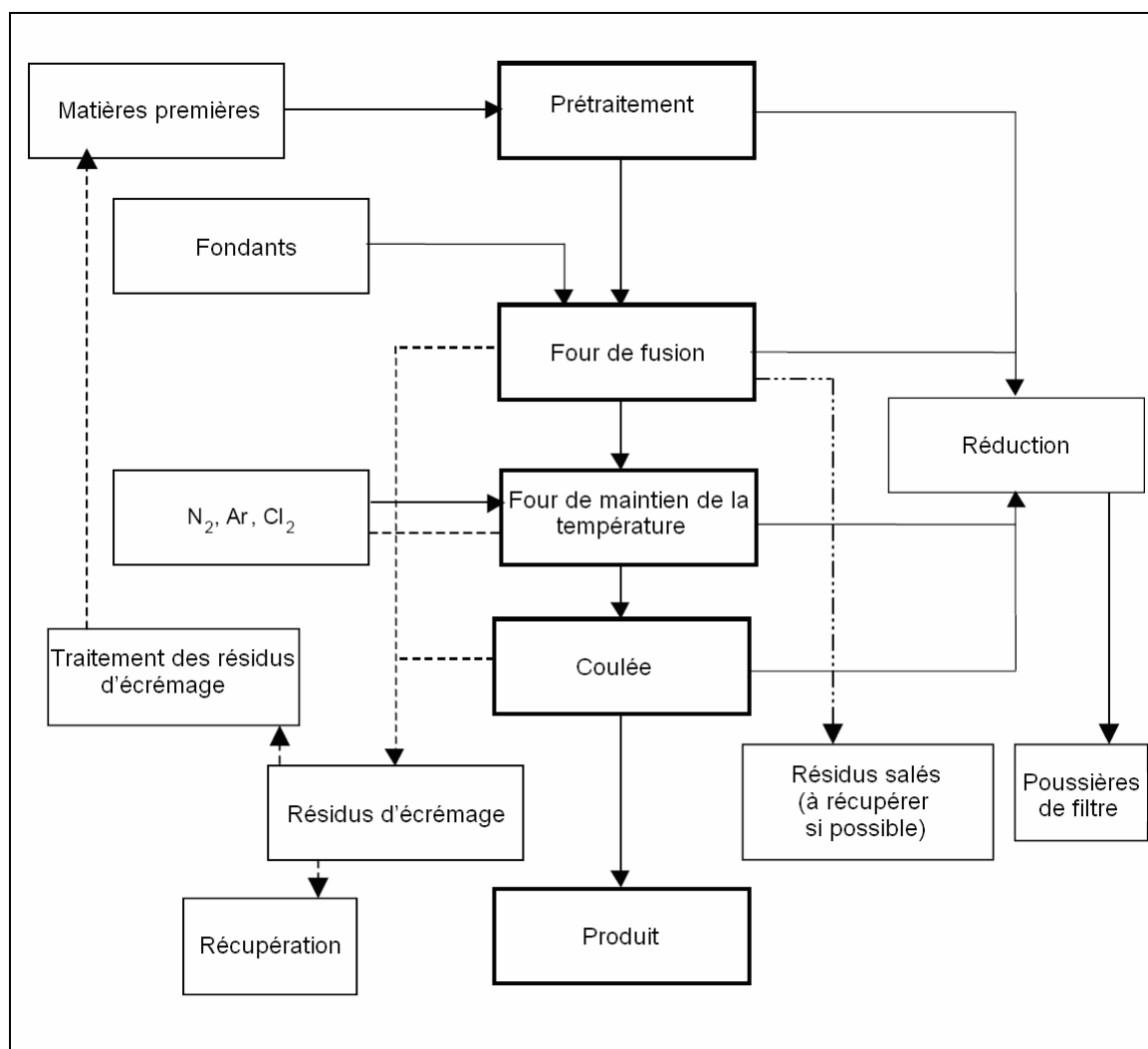


Figure 4.3 : Procédé générique de production d'aluminium de deuxième fusion

Une gamme de différents fondants est utilisée par les producteurs de deuxième fusion afin de faciliter le traitement du métal de diverses manières. Un exemple est l'utilisation de sel fondu (un mélange de chlorures de potassium et de sodium, et de certains fluorures) pour prévenir l'oxydation et absorber les impuretés. Les gaz de fusion contiennent des chlorures et du HCl produit à partir du sel. Des fondants réfractaires et des fondants fluorés sont également utilisés. Le laitier salin est vidangé après le métal. On constate des variations concernant la quantité de fondant salin utilisée. Cette dernière dépend du four utilisé et de la teneur en oxydes de la matière première. Le prétraitement de la charge peut réduire l'utilisation de sel de moitié (Exemple 4.06). Il a également été signalé que jusqu'à 1,8 kg de sel par

kg de composés non métalliques est utilisé pour un four tournant statique et $< 0,5$ kg par kg pour un four tournant inclinable [tm 145, Winter 1998].

L'utilisation d'un four réverbère à puits latéral doté d'un bassin de chargement et d'un système de pompage peut améliorer le degré de qualité de résidus produits, y compris les produits minces et les petites tournures qui peuvent être fondus dans ces fours. Il peut également réduire la perte de métal par oxydation sans utiliser de grandes quantités de sels ou autres fondants [tm 121, Hoogovens 1998 ; tm 122 et 123 ETSU 1998].

4.1.2.2 Techniques d'affinage et de coulée

Le métal peut être vidangé à partir du four de fusion dans lequel les ajouts d'alliages sont effectués soit directement dans un système de coulée, soit via un système de transfert dans un four de maintien (où d'autres ajouts d'alliage peuvent être effectués). Le métal est alors affiné soit dans le four de maintien, soit dans un réacteur en ligne. L'extraction des gaz et des autres métaux est généralement réalisée de la même manière que pour l'aluminium de première fusion. Du magnésium peut être présent dans l'aluminium de deuxième fusion et il peut être nécessaire de le réduire. Le traitement de l'aluminium en fusion avec des mélanges de gaz chlorés est utilisé pour éliminer le magnésium bien que de la cryolithe et du fluorure de potassium et d'aluminium soient également utilisés [tm 116, Al Expert Group 1998 ; tm 34, US EPA 1995]. Ce dernier matériau est un sous-produit de la production de certains alliages mère.

Les lingots, les billettes et les plaques de grandes dimensions sont coulés de la même manière que pour l'aluminium primaire et une gamme de lingots plus petits peut également être produite (pour approvisionner l'industrie du moulage, par exemple) dans une grande variété d'alliages dont le choix dépend de l'application finale. Il est également possible de transporter l'aluminium liquide par la route jusqu'aux utilisateurs finaux dans des poches isothermes spéciales.

4.1.2.3 Résidus d'écémage et laitiers

L'aluminium s'oxyde facilement et ce point constitue un facteur important dans les procédés de production. La fusion de l'aluminium sans atmosphère inerte génère une couche d'oxyde connue sous le nom de résidus d'écémage. Ces derniers sont écémés de la surface du métal avant la coulée. Les résidus d'écémage alors éliminés contiennent de 20 à 80 % d'aluminium. Les résidus d'écémage sont parfois traités dès leur retrait du four afin de réduire les émissions et toute oxydation supplémentaire du métal présent. Les méthodes comprennent le refroidissement par gaz inerte, la compression à chaud pour éliminer l'aluminium en fusion et le refroidissement dans des dispositifs de refroidissement spécialement conçus à cet effet.

Les résidus d'écémage froids sont traités au moyen d'un certain nombre de procédés destinés à récupérer l'aluminium. Par exemple, on peut les fondre dans un four tournant avec un fondant salin ou utiliser des techniques de séparation telles que le broyage fin et le traitement pour séparer l'oxyde du métal [tm 116, ALFED 1998]. Dans ce dernier cas, le métal peut être re-fondu dans des fours adaptés et la fine fraction peut passer par un autre procédé (elle peut être recyclée dans l'industrie sidérurgique ou dans le procédé de récupération de laitier salé, par exemple). Il a été reporté que la formation finale de laitier salé et de déchets était réduite et que la consommation d'énergie diminuait en raison de la charge de matériau inerte moins importante dans le four [ALSA 1999].

Les fours tournants sont utilisés pour récupérer l'aluminium contenu dans les résidus d'écémage et dans la fraction métallique issue du traitement des résidus d'écémage. Un fondant salin est généralement utilisé pour faciliter ce procédé : le sel réduit l'oxydation et favorise l'élimination de certaines impuretés (ex. : Mg, Ca, Li). Plusieurs installations existent dans lesquelles les laitiers salés peuvent être récupérés à l'aide d'un procédé de lavage et de cristallisation. Les procédés peuvent produire des granules et des sels d'aluminium recyclé. Il a été reporté [tm 90, Al Experts 1998] que la fraction d'oxyde métallique (principalement des oxydes d'aluminium, de calcium et de magnésium)

pouvait subir une transformation supplémentaire et être lavée de manière à produire des fines d'oxyde d'aluminium revendues à l'industrie du ciment.

4.1.2.4 Récupération du laitier salé

Les gros blocs de laitier salin sont concassés afin de former des morceaux de taille utilisable et tamisés afin de récupérer les granules métalliques d'aluminium (généralement jusqu'à 10 %). Le matériau finement broyé est alors dissout dans l'eau de manière à ce que les chlorures entrent en solution et produisent une saumure, laissant l'oxyde d'aluminium insoluble et les particules d'aluminium les plus fines, qui ne sont normalement pas économiquement recyclables comme l'est le métal. Les gaz sont émis à partir de cette étape du procédé et contiennent principalement de l'ammoniac, du méthane, de l'hydrogène et de la phosphine. Des émissions de poussières risquent également de se produire lors des opérations de concassage. Il est possible d'utiliser ces gaz comme combustible pour d'autres étapes du procédé [tm 116, ALFED 1998]. La saumure est filtrée afin d'en extraire les oxydes insolubles et la solution est alors envoyée dans une unité d'évaporation et de cristallisation dans lesquels les chlorures de sodium et de potassium initiaux pourront être récupérés. Ces chlorures sont alors réutilisés comme fondant dans le procédé de fusion.

Les oxydes métalliques restants contiennent des oxydes de calcium, de magnésium et d'aluminium (jusqu'à 65 % de Al_2O_3) et ainsi que des sulfates, des chlorures et des nitrates [tm 206, TGI 1999]. Lorsque la fraction oxydée possède des marchés potentiels, un lavage supplémentaire est nécessaire pour réduire ces anions à des niveaux utilisables. La saumure provenant du lavage peut être renvoyée vers l'étape de dissolution. Il a été reporté qu'il était dans certains cas possible de récupérer la totalité des matériaux présents dans le laitier salé [tm 90, Al Experts 1998].

4.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

4.2.1 Aluminium primaire

En plus du CO₂ qui est inhérent au procédé, des poussières, du SO₂, du HF, des particules de fluorures, du CO, des PFC et des HAP provenant du système d'extraction des gaz et du système de ventilation du hall d'électrolyse risquent d'être émis dans l'air. Des poussières, des métaux, des chlorures et des produits de combustion provenant des fours de maintien et de traitement situés dans l'atelier de fonderie risquent également d'être émis dans l'air [tm 6, HMIP Al 1993 ; tm 100, NL Al 1998].

Des émissions potentielles de particules, de SO₂, fluorures et de HAP provenant des épurateurs par voie humide et des eaux de ruissellement peuvent être rejetées dans l'eau et dans la mer.

Les principales sources de déchets sont les matériaux des garnissages de cuve usagés.

Les HAP émis dans l'eau doivent être déclarés et exprimés comme les six composés figurant sur la liste de Borneff, ceux émis dans l'air exprimés en B(a)P [tm 29, PARCOM 1997 ; tm 128, Nordheim 1997].

La production d'anodes, de même que la production de graphite, est traitée dans le Chapitre 12 du présent document. L'intégration des mégots d'anode provenant de la production d'aluminium dans les intrants de matières premières de ce procédé contribue à l'émission de fluorures.

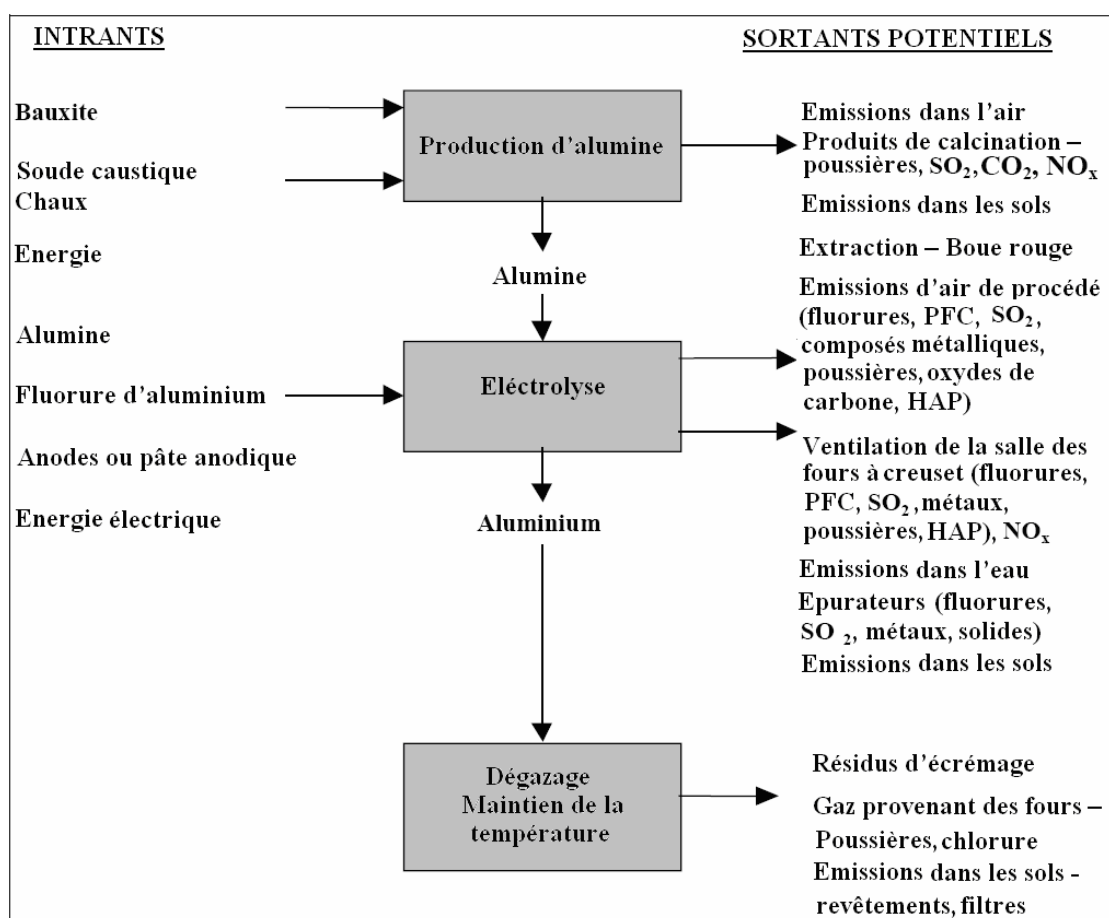


Figure 4.4 : Intrants et sortants utilisés pour la production d'aluminium primaire [FIGURE : salle de four à creuset → halle d'électrolyse] [sortants halle d'électrolyse / émissions dans l'eau : ajouter « HAP »]

4.2.1.1 Energie et autres intrants

Les intrants de matériaux et d'énergie nécessaires pour ce procédé sont importants. Environ deux tonnes de bauxite sont nécessaires pour produire une tonne d'alumine qui, à son tour, permet d'obtenir 0,53 tonne d'aluminium. Les anodes en carbone sont consommées : de 0,4 à 0,45 tonne de carbone est utilisée par tonne d'aluminium produite. Les coûts en énergie sont également élevés et pourraient représenter environ 30 % des coûts de production.

La production d'alumine nécessite de l'énergie pour la digestion et la calcination. La consommation d'énergie est essentiellement influencée par l'origine et la composition chimique de la bauxite, par le type d'autoclaves et de fours de calcination utilisé. La quantité d'énergie utilisée dans les usines européennes s'étend de 8,0 à 13,5 GJ par tonne avec une valeur moyenne établie à 11 GJ par tonne [tm 90, Al Expert Group 1998]. Les quantités de NaOH et de CaO utilisées sont également liées à la composition de la bauxite.

Paramètre	Plage typique (en kg/t d'alumine)
Bauxite	1 970 – 2 250
NaOH (50 %)	33 – 160
CaO	35 – 110
Eau	1 000 – 6 000
Energie (en GJ/t)	8,0 – 13,5

Tableau 4.1 : Plage d'intrants pour la production d'alumine

La réduction de la demande en énergie est essentiellement influencée par l'utilisation d'autoclaves tubulaires capables de fonctionner à des températures plus élevées en utilisant un moyen de transfert thermique à base de sel fondu. Ces usines ont une consommation d'énergie inférieure à 10 GJ par tonne.

L'étape d'électrolyse consomme beaucoup d'énergie : de 53 GJ par tonne pour les cuves CWPB les plus économes (production d'anode comprise) à 61 GJ par tonne pour certaines cuves Søderberg classiques.

Paramètre	anode précuite	Søderberg
Alumine – kg/t Al	1 900 – 1 940	1 900 – 1 940
Anodes – kg/t Al	400 – 440	
Pâte anodique – kg/t Al		500 – 580
Al F3 – kg/t Al	15 – 25	15 – 25
Durée de vie de la cathode (en années)	5 – 8	5 – 8
Puissance pour l'électrolyse – kWh/kg Al	12,9 – 15,5	14,5 – 17,0
Laminage des tiges – kg/t Al	1,0 – 3,0	
Pâte à brasque des cathodes – kg/t Al	0 – 25	
Puissance électrique totale – kWh/kg Al*	14,0 – 16,5	15,0 – 18
Note. * Y compris la perte du redresseur, le contrôle de la pollution et la consommation auxiliaire. Les données relatives à l'énergie sont basées sur les conventions utilisées par l'industrie. La production d'anodes représente 5 500 MJ/t.		

Tableau 4.2 : Gammes d'intrants pour l'électrolyse

La production d'aluminium à partir de métal recyclé n'utilise que 5 % de l'énergie requise par la production primaire [tm 29, PARCOM 1997].

Paramètre	Plage de valeurs
Résidus d'écumage produits – kg/t Al	10 – 25
Fondants – kg/t Al	0 – 1,5
Gaz – kg/t Al	0 – 6,0
Copeaux, etc. – kg/t Al	0 – 3
Eau – kg/t Al	200 – 12 000
Énergie utilisée pour l'homogénéisation – MJ/t Al	500 - 1 200
Energie utilisée par l'atelier de coulée – MJ/t Al	800 – 1 900*
Note. * A l'exclusion de la re-fusion du métal froid.	

Tableau 4.3 : Données relatives à la consommation d'un hall de fonderie

4.2.1.2 Émissions dans l'air

Ce procédé comporte cinq sources d'émissions différentes :

- gaz provenant de la calcination et du chauffage pour la production de l'alumine ;
- gaz de procédé provenant de la cuisson des anodes ;
- gaz de procédé provenant des cuves d'électrolyse ;
- ventilation du hall d'électrolyse ;
- dégazage et coulée.

Les sources d'émissions potentielles de l'étape d'électrolyse sont :

- fluorures ;
- hydrocarbures perfluorés (PFC) ;
- goudrons et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
- dioxyde de soufre (SO₂) et autres composés sulfurés ;
- poussières ;
- composés métalliques ;
- oxydes d'azote (NO_x) ;
- monoxyde de carbone (CO) ;
- dioxyde de carbone (CO₂).

Les émissions provenant des cuves d'électrolyse et du système de ventilation du hall d'électrolyse sont liées les unes aux autres par l'efficacité avec laquelle les gaz émis par les cuves sont captés [tm 29, PARCOM 1997 ; tm 100, NL Al 1998].

4.2.1.2.1 Captage des gaz

a) Cuves à anodes précuites

Les cuves à piquage central CWPB sont entièrement fermées et sont dotées d'un système d'extraction des fumées. S'agissant des cuves CWPB, le taux typique de captage des gaz émis par le procédé va de 95 à plus de 99 % en fonction de la conception du système d'extraction, de l'efficacité des couvercles des cuves et de la disposition des systèmes d'extraction et de filtration. L'efficacité du captage est subordonnée à un bon taux d'extraction, à des hottes de captage bien conçues et à de bonnes procédures d'exploitation de sorte qu'un minimum de hottes de captage soit ouvertes en même temps.

Les hottes ouvertes ou les hottes présentant un problème d'étanchéité laissent l'air entrer dans le système d'extraction, ce qui réduit l'efficacité de l'extraction au niveau des cuves restantes.

Les cuves à piquage latéral SWPB sont généralement partiellement fermées et atteignent un taux de captage compris entre 85 et 95 %. Cela est dû à la mauvaise disposition des hottes de captage et au recours à une couche d'alumine solide pour contenir les gaz. Certaines cuves SWPB sont entièrement recouvertes par des hottes mais doivent être ouvertes plus souvent afin d'ajouter de l'alumine, de remplacer les anodes ou de procéder à des opérations d'entretien.

b) Cuves à anodes Söderberg

La situation des électrodes VSS (cuves Söderberg à goujons verticaux) classiques est similaire à celle des cuves SWPB. Le dispositif de piquage de la croûte et le dispositif d'alimentation en alumine sont montés sur des véhicules et les cuves ne sont que partiellement recouvertes par des hottes de captage. Elles ne sont que faiblement automatisées, ce qui entraîne des problèmes pour contrôler avec précision la quantité d'alumine chargée dans le bain.

Les émissions de polluants atmosphériques dans le hall d'électrolyse augmentent lors du piquage de la croûte et du chargement de l'alumine. Les pièces de liaison en acier (goujons) qui servent de support aux anodes et conduisent l'électricité doivent être retirés à intervalles réguliers et remplacés plus haut sur l'anode. Les émissions de HAP augmentent pendant cette opération. La jupe de collecte des gaz qui entoure la gaine de l'anode est reliée à un brûleur à gaz relié à une conduite d'évacuation des gaz. Ce brûleur est destiné à brûler le CO et les hydrocarbures qui sont émis [tm 6, HMIP 1993].

Plusieurs améliorations ont été apportées aux systèmes d'électrodes Soderberg classiques. Les objectifs étaient de réduire les effets d'anode et les émissions provenant des cuves d'électrolyse à un niveau comparable à celui des émissions totales provenant des cuves à anodes précuites, y compris la cuisson des anodes. Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Piqueur-doseur pour l'alimentation automatique en alumine et contrôle de l'électrolyse ;
- Couverture complète de la croûte du bain d'électrolyse par la jupe de captage des gaz ;
- Utilisation de « pâte sèche » possédant une plus faible teneur en brai ;
- Brûleur amélioré pour l'incinération des HAP et des autres hydrocarbures dans les gaz émis par les cuves ;
- Haut de l'anode entièrement recouvert par une hotte de captage reliée à un dispositif d'évacuation des gaz séparé et à un épurateur à alumine par voie sèche ou haut de l'anode associée à la pâte à trou de goujon secs et à une hauteur d'anode accrue, selon l'efficacité.

Ces améliorations permettent une augmentation importante du captage des gaz [tm 29, PARCOM 1997]. Les unités Soderberg VSS classiques atteignent des taux de captage de l'ordre de 65 à 95 %, selon le degré de modification [tm 77, Al Expert Group 1998]. Les unités Soderberg à goujons horizontaux HSS réalisent des performances similaires à celles des cuves SWPB.

Par conséquent, les émissions non contrôlées se produisant dans le hall d'électrolyse et provenant des cuves SWPB et Soderberg sont importantes. Ces procédés intègrent souvent des systèmes d'épuration par voie humide tels que des épurateurs à eau de mer pour éliminer les fluorures et les HAP des gaz de ventilation du hall d'électrolyse. Les cuves CWPB sont par nature plus efficaces pour capter les gaz de procédé, mais s'appuient sur de bonnes procédures de conception, d'entretien et d'exploitation. Le tableau suivant montre la concentration de plusieurs composés dans les gaz provenant des cuves.

Type de cuve	Quantité totale de fluorures (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	Dioxyde de soufre (mg/Nm ³)
Søderberg VSS	700 – 1 700	500 – 1 800	500 – 2 000
Précuite avec hottes	75 – 500	150 – 500	50 – 400

Tableau 4.4 : Concentrations des gaz non traités provenant des cuves d'aluminium primaire

[tm 29, OSPARCOM 1997]

4.2.1.2.2 Fluorures

Des fluorures solides et gazeux sont émis dans les effluents gazeux par les cuves au cours de l'électrolyse. Le principal polluant (de 50 à 80 %) est le fluorure d'hydrogène gazeux (HF), tandis que le reste est constitué de fluorures solides (essentiellement du fluorure d'aluminium et de la cryolithe). Le HF se forme lors de la réaction du fluorure d'aluminium et de la cryolithe avec l'hydrogène introduit dans la cuve sous forme d'eau fixé sur l'oxyde d'aluminium, sous forme d'hydrogène résiduel dans les anodes et sous forme d'humidité dans l'air. Les cuves modernes étant souvent utilisées avec un fort excès stœchiométrique de AlF_3 (12 - 13%), la formation de fluorures a augmenté au fil des ans et le captage des fumées a pris de plus en plus d'importance [tm 100, L Al 1998].

La quantité totale de fluorures émise par les cuves varie entre 20 et 40 kg de fluorures par tonne d'aluminium. Avec un taux de captage supérieur à 98 % et un taux d'épuration supérieur à 99,5 voire 99,9 % dans les installations d'épuration par voie sèche, les émissions canalisées peuvent varier de 0,02 à 0,2 kg de fluorures par tonne d'aluminium. L'alumine est utilisée comme moyen d'épuration. L'alumine est normalement retenue dans un filtre à manches ou dans un électrofiltre, et est ensuite directement utilisée dans les cuves d'électrolyse. Les fluorures captés dans l'alumine forment du fluorure d'aluminium et du fluorure de sodium (après réaction avec l'oxyde de sodium présent dans l'alumine) et contribuent à la quantité de cryolithe présente dans le bain d'électrolyse. Plusieurs installations utilisant des épurateurs à alumine produisent un excédent de cryolithe à partir de la réaction des fluorures avec le sodium présent dans l'alumine. Cet excédent est vendu en tant que « bain excédentaire ».

Les émissions non captées sont rejetées dans l'atmosphère du hall d'électrolyse et se diffusent par le système de ventilation. Elles peuvent représenter de 0,4 à 0,8 kg par tonne d'aluminium selon les calculs de PARCOM, ce qui donne une quantité totale de fluorures émise comprise entre 0,4 à 1,0 kg F par tonne d'aluminium [tm 29, PARCOM 1997].

La plupart des unités Söderberg exploitées en Scandinavie utilisent des épurateurs par voie humide (utilisant de l'eau de mer ou de la soude caustique) en plus des épurateurs par voie sèche pour éliminer le dioxyde de soufre (SO_2) des gaz émis [tm 29, PARCOM 1997 ; tm 100, NL Al 1998]. Certaines installations utilisent également des épurateurs à eau de mer pour traiter l'air de ventilation afin d'éliminer les fluorures, le dioxyde de soufre et les poussières présents dans l'air de ventilation du hall d'électrolyse.

Des fluorures et des chlorures se forment également lors des phases de dégazage et d'affinage. La quantité et la composition des émissions dépendent des agents de dégazage et d'affinage utilisés.

4.2.1.2.3 PFC

Des PFC sous forme de tétra-fluorométhane (CF_4) et d'hexa-fluoroéthane (C_2F_6) se forment lors des effets d'anode. Ils sont rejetés selon un rapport $\text{CF}_4:\text{C}_2\text{F}_6$ d'environ 10:1. Les technologies existantes ne permettent pas de les éliminer du flux gazeux, une fois qu'ils se sont formés [tm 29, PARCOM 1997].

Un effet d'anode se produit lorsque la teneur en alumine de l'électrolyte tombe en dessous de 1 ou 2 % et qu'un film gazeux se forme au niveau de l'anode. Ce phénomène stoppe la production de métal et augmente la tension de la cuve qui passe alors de 4 – 5 à 8 – 50 volts. Les facteurs influençant la création de PFC sont la fréquence et la durée des « effets d'anode » et la tension de fonctionnement de la cuve. Le contrôle de la tension de la cuve et des ajouts d'alumine constitue un facteur majeur pour le contrôle des effets d'anode [tm 6, HMIP 1993].

Il est possible de limiter la quantité de PFC émise par les installations modernes en utilisant des points d'alimentation semi-continue en alumine et en améliorant le contrôle du procédé. Ces cuves CWPB peuvent fonctionner avec une fréquence d'effet d'anode comprise entre moins de 0,1 et 0,5 effet d'anode par cuve et par jour, soit une plage d'émissions comprise entre 0,02 et 0,1 kg de PFC par tonne d'aluminium [tm 77, Al Expert Group 1998 ; tm 100, NL Al 1998]. De nombreuses installations plus anciennes utilisaient les effets d'anode comme moyen de contrôle de la teneur en alumine du bain. Par conséquent, les émissions de PFC pouvaient atteindre des niveaux bien plus élevés. L'utilisation de systèmes de contrôle modernes et de points d'alimentation en alumine automatiques dans les cuves à anodes précuites et Soderberg permet de limiter le nombre et la durée des effets d'anode [tm 29, PARCOM 1997; tm 77, Al Expert Group]. Un système automatique de désactivation des effets d'anode peut également être utilisé conjointement au système de contrôle (utilisation d'une variation de hauteur du plan anodique ou d'air comprimé, par exemple).

Les émissions de PFC constituent un problème environnemental majeur pour l'industrie de l'aluminium et des recherches approfondies sont actuellement menées pour améliorer les connaissances pour le moment incomplètes des problèmes et des solutions possibles.

4.2.1.2.4 Goudrons et HAP

Les émissions de goudron et de HAP lors de l'électrolyse dans les cuves à anodes précuites sont négligeables en raison du fait que les anodes sont cuites lors d'une opération séparée. De très faibles quantités de goudron et de HAP peuvent être émises par un nombre limité de cuves à anodes précuites utilisant de la pâte de carbone pour l'assemblage des anodes et pour les colliers de protection. Les mesures effectuées lors du démarrage des nouvelles cuves et des installations utilisant de la pâte à collier indiquent que les émissions sont négligeables [tm 100, NL AL 1998].

Les installations comprenant une unité de production d'anodes auront une source de goudrons et de HAP à partir de cette partie du procédé. La production d'anodes est traitée dans le Chapitre 12 du présent document, mais les émissions provenant d'un procédé intégré relèvent de ce chapitre. Il existe des exemples où les gaz de procédé provenant d'une installation d'anodes partagent le même épurateur à alumine et le même filtre à manches que le procédé d'électrolyse. Les résultats obtenus sur ces installations n'indiquent aucune différence au niveau des performances du système de dépollution lorsque les gaz de procédé venant de la production d'anode sont inclus. On peut en conclure que l'épurateur à alumine élimine efficacement les HAP et les goudrons d'une installation de production d'anodes ou de cuves Soderberg. L'alumine usagée provenant des épurateurs est utilisée comme charge pour les cuves (mais pas pour couvrir le bain d'électrolyse). Des filtres électrostatiques sont également utilisés pour éliminer le goudron [cf. Chapitre 12]. Des épurateurs par voie humide permettront également d'éliminer une partie des HAP des gaz de ventilation, notamment la fraction contenant des particules.

Dans les installations Soderberg, des goudrons et des HAP sont émis lors de l'électrolyse en raison de l'auto-cuisson de l'anode. Des émissions se dégagent par évaporation lors de la carbonisation de la pâte. L'arrachage des goujons est l'opération qui donne la quantité d'émissions la plus importante. Les émissions dépendent de la conception de l'anode, de la qualité de la pâte et des procédures d'exploitation. En règle générale, l'utilisation d'épurateurs par voie sèche permet d'éliminer les goudrons et les HAP efficacement des gaz provenant des cuves [tm 29, PARCOM 1997, tm 77, Al expert group]. L'utilisation de pâte anodique sèche et de sommets d'anode plus froids permet de réduire les émissions de HAP provenant de l'anode.

4.2.1.2.5 Dioxyde de soufre et composés sulfurés

Les anodes actuellement utilisées ont une teneur en soufre comprise entre 1 et plus de 3,5 %. Le soufre réagit avec l'oxygène et entraîne ainsi l'émission de dioxyde de soufre ou de sulfure de carbone (COS). En raison des différences dans la teneur en soufre des anodes, les émissions de dioxyde de soufre peuvent aller de 8 à plus de 30 kg par tonne d'aluminium, sur la base d'une consommation d'anode de 0,4 tonne par tonne d'aluminium (teneur en soufre comprise entre 1 et plus de 3,5 %).

S'agissant du COS, il a été reporté qu'environ 10 % du soufre présent dans l'anode se transforme en COS (soit 2 kg/t d'aluminium pour les anodes contenant 2,5 % de soufre).

Les émissions de SO₂ via la ventilation du hall d'électrolyse vont de 0,2 à 0,6 kg par tonne (concentration : de 0,1 à 3 mg/Nm³). Les émissions via l'air de procédé provenant des cuves ont une concentration typique comprise entre 50 et 400 mg/Nm³ [tm 29, PARCOM 1997 ; tm 100, NL AI 1998]. Lorsque les gaz de procédé sont épurés par voie humide, les concentrations dans les émissions atmosphériques sont généralement comprises entre 5 et 40 mg/Nm³.

Il a été reporté que le soufre présent dans les anodes pouvait avoir un effet bénéfique pour la suppression des effets indésirables liés au sodium contenu dans les mégots d'anode dans la perspective de recyclage [tm 77 AI Expert Group 1998].

4.2.1.2.6 Poussières

L'alumine et la cryolithe sont les principales poussières émises au cours de l'électrolyse. L'alumine utilisée pour éliminer les fluorures des gaz émis (appelée alumine secondaire) est également émise si le système de collecte des poussières n'est pas efficace. La surface de cette alumine secondaire contiendra du HF adsorbé à sa surface.

La quantité totale de poussières générée varie et dépend du type de procédé appliqué et du type d'alumine, mais est comprise entre 0,6 et 10 kg par tonne d'aluminium. Les concentrations en poussières typique de la ventilation du hall d'électrolyse sont comprises entre 0,5 et 5 mg/Nm³ alors que les concentrations en poussières de l'air de procédé sont comprises entre 150 et 500 mg/Nm³ avant dépollution et entre 1 et 20 mg/Nm³ après dépollution [tm 100, NL AI 1998].

La coulée est une autre source de poussières (et de métaux) et les fumées provenant des halls de fonderie sont généralement captées et traitées dans un filtre à manches. Un certain nombre d'études ont été menées sur la présence de dioxines dans les fumées générées lors du procédé de coulée. L'utilisation de chlore pour le dégazage et la présence de carbone dans les gaz de combustion peuvent favoriser leur formation. Toutes les mesures effectuées dans des halls de fonderie primaire indiquent des niveaux bien inférieurs à 1 g/an.

4.2.1.2.7 Métaux

On sait que des métaux sont présents sous forme de trace dans l'alumine et le fluorure d'aluminium et qu'ils peuvent par conséquent être émis lors de l'électrolyse. Du tellure est extrait de l'alumine produite dans une installation et constitue ainsi un agent contaminant potentiel. D'autres métaux volatils sont également présents et peuvent être émis de la halle des cuves et du hall de fonderie. La quantité de données disponibles sur l'impact environnemental est limitée, mais les traces de métaux ne sont pas considérées comme étant des émissions importantes [tm 100, NL AI 1998].

4.2.1.2.8 Oxydes d'azote

Des oxydes d'azote (NO_x) sont produits lors de l'électrolyse en raison de la présence d'azote dans l'anode, qui peut s'oxyder pour former des NO_x. La teneur en azote des anodes est généralement comprise entre 0,2 et 0,4 %. Lorsque l'azote est entièrement transformé en NO_x, les émissions peuvent être comprises entre 0,5 et 2 kg de NO₂ par tonne d'aluminium (concentrations comprises entre 5 et 20 mg/Nm³ dans la cheminée). La quantité réelle de NO_x émis fait toujours l'objet de débats. Des mesures réalisées dans deux usines à anodes précurées norvégiennes ont montré un niveau d'émission de 0,1 à 0,2 kg de NO₂ par tonne d'aluminium [tm 100, NL AI 1998]. Les gaz de combustion provenant des brûleurs utilisés dans les fours de maintien et les fours de fusion du hall de fonderie contiendront des oxydes d'azote.

4.2.1.2.9 Monoxyde de carbone

Du monoxyde de carbone (CO) est produit au cours de l'électrolyse en raison de la contre-réaction de l'aluminium métal dissout dans l'électrolyte avec le CO₂ produit au niveau de l'anode ($2 \text{ Al} + 3 \text{ CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ CO}$). Cela a pour effet de réduire l'efficacité de la cuve. Dans une fonderie moderne, le dégagement de CO avant toute réoxydation en CO₂ est de l'ordre de 100 à 150 kg par tonne d'aluminium. La production de CO augmente également pendant un effet d'anode [tm 6, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998].

4.2.1.2.10 Dioxyde de carbone

Du dioxyde de carbone (CO₂) se forme au cours de l'électrolyse en raison de la réaction de l'anode en carbone avec l'oxygène généré par l'électrolyse et d'une réaction secondaire avec l'air. Une cuve à anode précurée efficace consomme environ 0,4 tonne d'anodes en carbone par tonne d'aluminium, soit 1,4 à 1,7 tonne de CO₂ par tonne d'aluminium. Ces émissions sont toutefois bien inférieures aux émissions de CO₂ produites lors la combustion de combustibles fossiles pour la génération du courant électrique nécessaire pour l'électrolyse [tm 77, Al Expert Group 1998]. Du dioxyde de carbone se dégage également des brûleurs utilisés dans les fours de maintien et dans les fours de fusion.

4.2.1.2.11 Récapitulatif des principaux polluants atmosphériques

Un récapitulatif de l'importance des principaux polluants atmosphériques et de leurs sources d'émission, tel que décrit ci-dessus et fondé sur une recherche bibliographique, est donné dans le tableau suivant.

Composé	Gaz émis par les cuves d'électrolyse	Ventilation du hall des cuves	Dégazage et fours de maintien
Fluorures – gazeux et F total	•	•••	• (chlorures)
PFC	•••	•	
Goudrons et HAP	•**	••**	
SO ₂ (sans épurateurs) et COS	••*		•
Dioxyde de carbone	••		
Poussières	•	•	•
<p>Note. * Les épurateurs par voie humide sont généralement utilisés après une épuration par voie sèche en Scandinavie afin d'éliminer le SO₂ et sont généralement associés à l'utilisation d'eau de mer comme support d'épuration.</p> <p>** Les goudrons et les HAP sont importants pour les cuves Söderberg et les installations à anodes pré-cuites comportant un unité de production d'électrodes intégrée. Ils peuvent également être importants pour les rares usines utilisant de la pâte anodique pour l'assemblage des anodes.</p> <p>••• Plus important.....• moins important</p>			

Tableau 4.5 : Importance des émissions potentielles issues de la production d'aluminium primaire

Paramètre	Anode Précurée	VS
HF – kg/t Al	0,15 – 2,0	0,2* - 3,5
Quantité totale de fluorures - kg/t Al	0,3 – 4,0	0,5* - 4,0
Poussières - kg/t Al	0,6 – 7,0	1,5* – 10,0
SO ₂ - kg/t Al	10 – 30	10 – 30
SO ₂ - kg/t Al si un épurateur par voie humide est utilisé	1,0 – 3,5	1,0 – 3,5
CF ₄ /C ₂ F ₆ - kg/t Al	0,02 – 1,0	0,2 – 1,0
Dioxyde de carbone – t/t Al	1,4 – 1,6	1,6 – 1,9
B(a)P - g/t Al	-	5 – 20
Note. * Avec épuration par voie humide pour la ventilation.		

Tableau 4.6 : Quantité totale d'émissions atmosphériques provenant des fonderies d'aluminium primaire

L'importance des émissions non contrôlées provenant de la ventilation du hall d'électrolyse est basée sur un taux de captage des fumées provenant des cuves de l'ordre de 98 %. Les cuves CWPB ordinaires peuvent atteindre ce niveau d'efficacité, mais lorsque ce niveau est inférieur, comme par exemple dans les cuves de type SWPB ou Søderberg, le poids des émissions venant de la ventilation du hall d'électrolyse augmente [tm 77, Al Expert Group 1998 ; tm 100, NL Al 1998].

Les émissions gazeuses dues à l'air de ventilation des installations de première fusion ont été calculées [tm 29, PARCOM 1997]. Ce calcul était basé sur la concentration des composés gazeux provenant des cuves et sur l'efficacité de la hotte de captage et du système d'extraction. Ce calcul est important car il permet de déterminer l'ampleur des émissions non captées. Il amène la même conclusion que celle tirée concernant l'importance de l'efficacité du système de captage des fumées et ce facteur est réputé de la plus haute importance pour ce travail. La plupart des fonderies procèderont à une surveillance régulière de ce point.

Paramètre	Émissions (kg/t Al)
Poussières	0,02 – 0,3
NO _x	< 0,1 – 0,4
SO ₂	0 – 3

Tableau 4.7 : Hall d'électrolyse d'aluminium primaire - émissions dans l'air

4.2.1.2.12 Gaz à effet de serre

La production d'aluminium primaire entraîne des émissions de CO₂ comme produit inhérent au procédé d'électrolyse (utilisant des anodes à base de carbone) et à la combustion de combustible pour produire de l'alumine et à la production d'électricité lorsqu'elle est fondée sur de combustibles fossiles. Au-delà de cela, des carbones polyfluorés (PFC) tels que le CF₄ et le C₂F₆ sont émis par les cuves d'électrolyse pendant l'effet d'anode. Ces deux gaz sont de puissants gaz à effet de serre possédant un potentiel de réchauffement global à 100 ans de 6 500 et 9 200, respectivement.

Les calculs effectués pour les fonderies d'aluminium primaire européennes montrent que la quantité totale de PFC émise, calculée sous forme d'équivalent d'émissions de CO₂, était d'environ 15 millions de tonnes en 1990. L'amélioration du contrôle du procédé d'électrolyse a considérablement réduit la fréquence et la durée de chaque effet d'anode. Les émissions de PFC ont par conséquent été considérablement réduites au cours des dix dernières années et des calculs montrent que les émissions en équivalent de CO₂ inférieures à 6 millions de tonnes seront atteintes en l'an 2000.

Les améliorations apportées à l'efficacité des autres parties du procédé ont également contribué à une réduction des émissions directes de CO₂, réduisant ainsi la quantité totale d'émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de PFC spécifiques provenant des différentes technologies sont données dans le tableau 4.5. Les améliorations et les réductions supplémentaires sont abordées dans la section consacrée aux techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

Des travaux sont toujours en cours sur une installation pilote afin de développer un matériau anodique inerte permettant de ne pas produire de dioxyde de carbone pendant l'électrolyse : il s'agit d'une technique émergente. L'élimination des anodes en carbone empêcherait également la formation de PFC.

4.2.1.3 Émissions dans l'eau

La production d'aluminium primaire est, par nature, un procédé sec. Les rejets d'eaux usées sont généralement limités à l'eau de refroidissement, aux eaux de ruissellement de surface et des toits et à l'eau de mer des épurateurs utilisés pour traiter les gaz de ventilation du hall d'électrolyse. Les eaux de

ruissellement peuvent être contaminées à la suite du stockage à l'air libre de matières premières et de solides. Les valeurs typiques relatives à cette contamination sont inférieures à 0,03 kg/tonne d'aluminium pour les solides en suspension et inférieures à 0,02 kg/tonne d'aluminium pour les fluorures dissous. De plus, des quantités considérables d'eaux usées peuvent être rejetées lorsque des systèmes par voie humide sont utilisés pour le contrôle de la pollution de l'air [tm 100, NL AI 1998].

La production d'anodes peut entraîner le rejet d'eaux usées constituées de l'eau de refroidissement utilisée pour refroidir les anodes vertes ou les rejets gazeux. Le procédé de refroidissement peut être réalisé au moyen de systèmes d'eau indirects, ce qui entraîne le rejet d'eau de refroidissement. Des systèmes d'eau indirects peuvent également être utilisés pour refroidir les rejets gazeux afin de leur permettre d'être dépollués au moyen des techniques habituelles (filtres à manches, filtres électrostatiques) [tm 100, NL AI 1998].

La production d'alumine à partir de bauxite est un procédé qui élimine les rejets d'eau en utilisant un système en circuit fermé. L'eau présente dans la boue rouge ou utilisée pour la transporter vers le site de décharge est hautement alcaline et est pompée en retour vers l'usine et réutilisée [tm 77, AI Expert Group 1998].

L'étape d'électrolyse est un procédé sec et aucune eau usée n'est produite directement. La contamination de l'eau de pluie est évitée par la bonne pratique décrite dans la section 2.9.

Paramètre	Anode pré-cuite	Anode Søderberg
Fluorure – kg/t Al	0 – 3,0	0 – 5,0
Solides en suspension – kg/t Al	0 – 6,0	0 – 6,0
HAP (Boneff 6) – g/t Al	0 – 0,01	8 - 15

Tableau 4.8 : Émissions dans l'eau provenant des usines d'électrolyse d'aluminium de première fusion

4.2.1.4 Résidus de procédé et déchets

La production de métaux est liée à la génération de plusieurs sous-produits, résidus et déchets qui figurent également dans le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil n° 94/3/CEE). Les résidus spécifiques les plus importants liés au procédé figurent dans la liste ci-dessous.

4.2.1.4.1 Boue rouge

La boue rouge produite lors de l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite est un déchet important et doit être éliminé. La boue provenant du procédé d'extraction est généralement alcaline et contient de 3 à 12 kg de NaOH par tonne d'alumine produite. Elle doit par conséquent être manipulée avec précaution. La pratique actuelle consiste à déposer la boue rouge dans ou à proximité du site dans des bassins étanches spécialement conçus à cet effet. L'excédent d'eau provenant des bassins est généralement renvoyé dans le procédé.

Un sel contenant du vanadium peut également être produit lors de l'élimination des impuretés de la solution produite durant la digestion. Ce sel est une source majeure d'autres métaux tels que le vanadium et le tellure.

4.2.1.4.2 Garnissages de cuve usagés

Avec une cathode ayant une durée de vie comprise entre 5 et 8 ans, courante dans les installations modernes, la quantité de garnissages de cuve usagés générée est comprise entre 20 et 30 kg/t d'aluminium produite. On considère généralement que les garnissages de cuve usagés sont constitués de deux fractions distinctes : la partie en carbone et le matériau réfractaire. La partie en carbone est la cathode de la cuve d'électrolyse et le matériau réfractaire est constitué de différents types de matériaux isolants.

Les deux fractions sont souvent séparées lors du démantèlement de la cathode. La cathode usagée contient également un peu de matériau du bain fondu, des barres en acier utilisées pour conduire l'électricité vers la cathode en carbone et des paillettes d'aluminium métal provenant de la pénétration du métal dans la cathode. Ces pièces sont soit réutilisées directement dans l'usine, soit, dans le cas des barres en acier envoyées à l'extérieur de l'usine pour y être recyclées. La partie en carbone est relativement homogène, tandis que la partie réfractaire peut être composée d'un certain nombre de types différents de matériaux réfractaires ou d'autres types d'isolants.

Le tableau suivant donne les résultats de l'analyse de la composition-type d'un garnissage de cuve usagé [tm 134, EAA 1998].

Composé	Revêtement en carbone	Isolation
	Plage de valeurs (poids en %)	
Al ₂ O ₃	0 – 10	10 – 50
C	40 – 75	0 – 20
Na	8 – 17	6 – 14
F	10 – 20	4 – 10
CaO	1 – 6	1 – 8
SiO ₂	0 – 6	10 – 50
Al métallique	0 – 5	0
CN	0,01 – 0,5	0 – 0,1
CN, libre	0 – 0,2	0 – 0,05
Autres		

Tableau 4.9 : Composition d'un garnissage de cuve usagé

Les composés problématiques de ce matériau sont les fluorures et les cyanures, tous deux solubles. En outre, toute exposition de ce matériau à l'humidité entraînera un lixiviat alcalin et libèrera de petites quantités de NH₃ et de PH₃. Les HAP ne sont pas considérés comme étant un problème dans la mesure où le revêtement de carbone a déjà été carbonisé à des températures supérieures à 1 250 °C et que la pâte de bourrage a été chauffée à plus de 900 °C dans la cuve d'électrolyse. Les composés problématiques susmentionnés se trouvent essentiellement dans la partie en carbone du garnissage de cuve usagé et dans les parties en matériau réfractaire directement en contact avec cette dernière. Comme on peut le constater à la lecture des tableaux, la quantité de ces composés présente est moins importante dans la partie réfractaire.

Les garnissages de cuve usagés peuvent être réutilisés, traités ou mis en décharge [tm 134, EAA 1998].

Réutilisation

Réutilisation dans les fours pyrométallurgiques.

Réutilisation pour la production de cryolithe.

Réutilisation dans l'industrie du ciment.

Réutilisation comme combustible.

Procédés de traitement

Procédé de four tournant Reynolds Metals

Procédé de pyrohydrolyse Elkem (produit également de la cryolithe).

Procédé Comalco Comtor.

Procédé Vortec/Ormet.

Procédé Alcoa/Ausmelt.

Pratiques de mise en décharge

Stockage en bord de mer.

Mise en décharge en tant que déchet dangereux.

4.2.1.4.3 Autres matériaux

Les résidus d'écémage provenant des procédés de maintien et de traitement représentent 15 à 20 kg par tonne d'aluminium produite. Ces matériaux contiennent de 30 à 80 % d'aluminium et leur refroidissement sous une couverture de gaz inerte les empêche de s'oxyder. Ils sont utilisés comme matière première pour la production d'aluminium de deuxième fusion. Les filtres usagés provenant du traitement du métal sont généralement mis en décharge. Les déchets solides produits par les installations de traitement des gaz (poussières et boues) peuvent être réutilisés [tm 77 et 90, Al Expert Group 1998].

Les mégots d'anode provenant de certaines usines sont également mis en décharge si ils ne sont pas conformes aux normes de qualité. Les garnissages de four provenant du procédé de coulée et du procédé de cuisson des anodes peuvent être récupérés ou mis en décharge.

Une bonne gestion des déchets et l'utilisation de méthodes de récupération permettent de réduire la quantité de déchets mis en décharge (cf. exemples).

Source	Utilisation/Options de traitement
Résidus d'écémage de l'Al	Récupération
Poussières sous filtre	Réutilisation dans le procédé
garnissages usagés	Carburant, fondant et garnissages de four
refractaires	Réutilisation lorsqu'ils proviennent de fours à anode
Acier	Récupération
Poussières de carbone (unité de fabrication d'anodes)	Réutilisation

Tableau 4.10 : Options permettant de réduire la quantité de déchets produite par une fonderie d'aluminium de première fusion

Source	Quantité (kg/t Al)
Résidus d'écémage de l'Al	15 – 25
garnissages usagés	20 – 30
Autres déchets dangereux	7 – 15
Déchets non dangereux	12 – 14

Tableau 4.11 : Quantités de déchets spécifiques provenant de la production d'aluminium de première fusion

La fonte provenant de l'unité de fabrication d'anodes est normalement refondue dans un four à induction et recoulé afin d'être utilisé dans le procédé. La fusion de la fonte contaminée par des fluorures est une source potentielle supplémentaire de ces émissions et des mesures de collecte et de dépollution appropriées sont nécessaires.

4.2.2 Aluminium de deuxième fusion

Des poussières, des composés métalliques, des chlorures, du HCl et des produits dus à une mauvaise combustion tels que des dioxines et d'autres composés organiques provenant des fours de fusion et de traitement risquent d'être émis. Une formation de dioxines dans la zone de combustion et dans la section de refroidissement du système de traitement des effluents gazeux (synthèse de novo) peut être

possible. Les émissions peuvent s'échapper du procédé soit sous forme d'émissions canalisées, soit sous forme d'émissions fugitives en fonction de l'âge de l'usine et de la technologie employée. Les émissions canalisées sont normalement surveillées de manière continue ou périodique et déclarées aux autorités compétentes par le personnel du site ou par des consultants extérieurs.

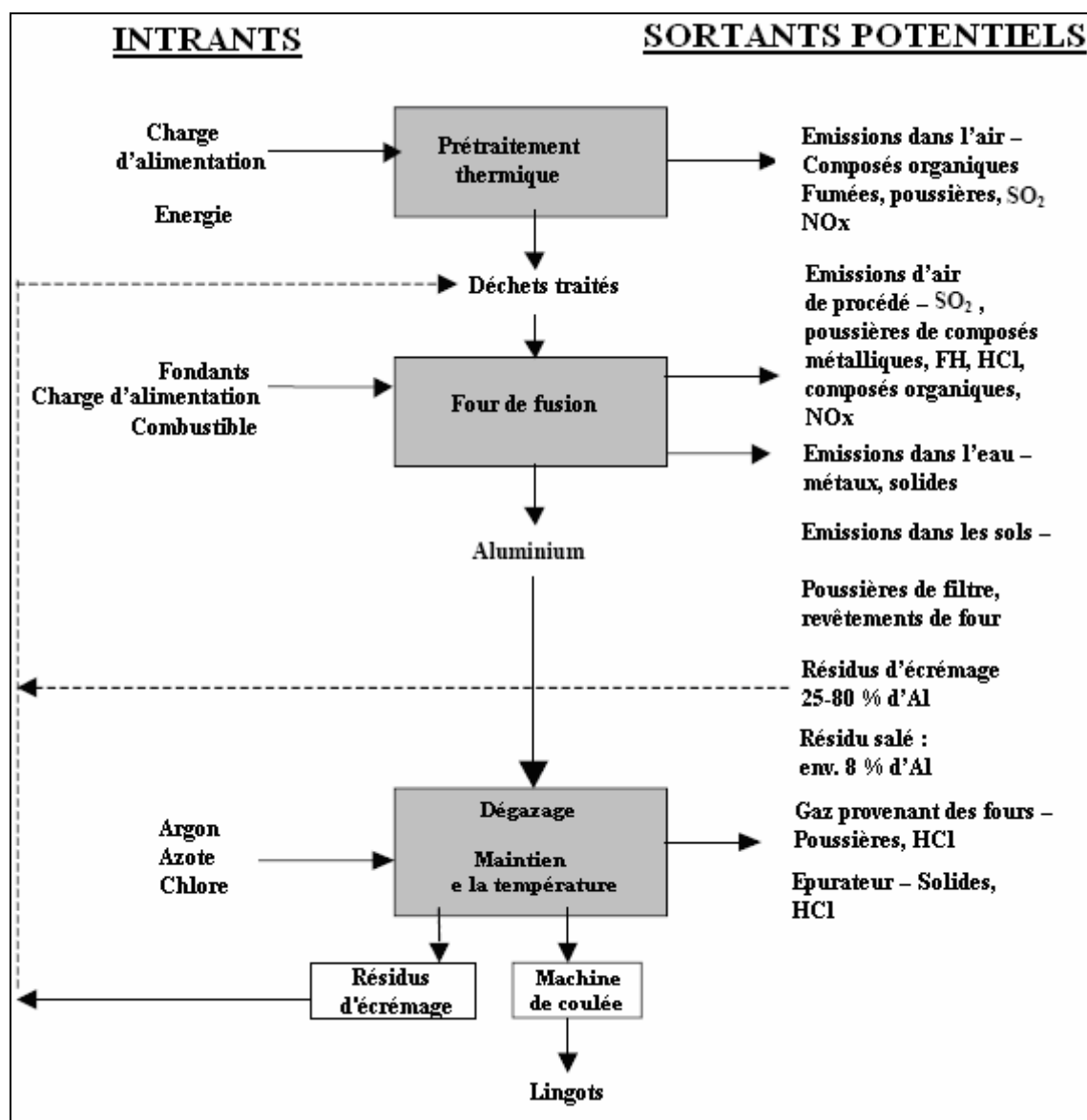


Figure 4.5 : Intrants et sortants pour la production d'aluminium de deuxième fusion

Note : les fumées et les poussières peuvent être associées à des composés organiques tels que les COV et les dioxines [FIGURE : case « prétraitement thermique », ajouter « pollution des sols : poussières sous filtre] [remplacer FH par HF]

De l'ammoniac et d'autres gaz peuvent être émis à partir d'un stockage, d'un traitement ou d'un transport inadapté des résidus d'écémage [tm 33, Mantle 1988]. De la poussière peut également être émise lors de la manutention et du traitement des résidus d'écémage. Il existe des risques d'émissions dans l'eau de matières solides en suspension, de métaux et d'huiles en cas de stockage inadapté de produit ou de matériau.

Le type et la qualité des déchets a une influence majeure sur l'importance des rejets. Ce point est traité en détail dans la section consacrée aux techniques à prendre en compte.

Les phases de prétraitement, de fusion, de dégazage et de maintien comportent des risques d'émissions.

Les procédés de prétraitement sont abordés dans la section 2.5. L'industrie de l'aluminium de deuxième fusion utilise principalement le séchage des tournures et l'élimination thermique des revêtements pour prétraiter les déchets ainsi que le broyage et d'autres procédés mécaniques et méthodes de concentration pour prétraiter les résidus d'écémage et les laitiers salés.

Les laitiers salés apparaissent lorsque des mélanges de sodium et de chlorure de potassium sont utilisés pour recouvrir le métal en fusion afin d'empêcher l'oxydation, d'augmenter le rendement de production et d'accroître l'efficacité thermique. Ces laitiers sont généralement produits dans des fours tournants et peuvent avoir un impact sur l'environnement s'ils sont déposés sur le sol. La quantité de laitier salé produite varie considérablement et dépend du type de matériau, du four, du degré de contamination de l'aluminium, etc. Des options existent pour la fusion sans sel dans certains fours utilisant plusieurs types de charge et des options existent pour le recyclage du laitier salé.

4.2.2.1 Émissions dans l'air

Les rejets potentiels dans l'air sont constitués de :

- poussières et fumées ;
- composés métalliques ;
- matières organiques (COV et dioxines) et CO ;
- oxydes d'azote (NO_x) ;
- dioxyde de soufre ;
- chlorures, HCl et acide fluorhydrique.

Une part importante de l'émission de ces substances est due au combustible utilisé et à la contamination de la charge. Une petite quantité de poussières est générée par les déchets pulvérulents fins et par les fumées de sel [tm 77 & 90, Al Expert Group 1998].

Composé	Prétraitement	Fusion	Affinage et dégazage
HCl, HF et chlorures	•	••	•••
Métaux et composés	••	••	••
Oxydes d'azote	•	••	• (gaz de combustion)
SO ₂	• (avec combustible adapté)	• (avec combustible adapté)	• (gaz de combustion)
Composés organiques (COV, dioxines)	•••	•••	
Poussières	•••	•••	••
Note. ••• Plus important.....• Moins important			

Tableau 4.12 : Importance des émissions potentielles dans l'air

En outre, des rejets de poussières et de phosphine risquent d'apparaître lors du traitement du laitier salin. Ces rejets peuvent être considérés comme un effet croisé.

4.2.2.1.1 Captage des gaz

Le Chapitre 2.7 traite des techniques utilisées. L'extraction des fumées est un élément important dans la production d'aluminium de deuxième fusion car des poussières et des fumées peuvent se dégager à partir des agents contaminants présents dans la charge ainsi que lors des phases de combustion et de fusion [tm 33, Mantle 1988]. La présence de plusieurs points possibles d'émission sur un four est également importante et le captage des émissions issues de ces points doit être assuré. En outre, divers

systèmes peuvent être utilisés pour réduire les émissions fugitives lors de la phase de chargement du procédé. Par exemple, des véhicules de chargement adhérant hermétiquement contre la porte de chargement peuvent être utilisés pour empêcher les émissions pendant le chargement.

L'autre facteur important est la combustion des revêtements organiques dans le four de prétraitement ou dans le four de fusion et les systèmes d'extraction et de dépollution peuvent tous être conçus pour prendre en charge le traitement de ces émissions. Les émissions fugitives peuvent être importantes à moins que les systèmes de captage des fumées soient bien conçus.

4.2.2.1.2 Poussières et métaux

Elles sont associées et émanent des gaz de combustion ou des déchets ou des fondants utilisés. Certains métaux, présents sous forme d'agents contaminants seront vaporisés dans la fumée émise lors de la fusion et formeront des poussières. La production de fumée en raison de la présence de carbone organique et de chlorures peut entraîner la formation de dioxines qui seront également associées aux particules. Une post-combustion est utilisée pour détruire les matières organiques qui s'échappent de la zone de combustion. L'injection de matériaux de traitement tels que la chaux, le bicarbonate de sodium et le carbone est une technique également utilisée. La plupart des installations utilisent alors des filtres à manches (à haut rendement) ou des filtres en céramique pour éliminer les poussières. Les émissions peuvent se situer entre 0,6 et 20 mg/Nm³. Un pare-étincelles ou une chambre de refroidissement les précède souvent afin d'assurer la protection du filtre. Une récupération de l'énergie peut être pratiquée, la plupart du temps des brûleurs régénératifs sont utilisés.

Teneur	Valeur typique (%)	Plage de valeurs (%)
CaO	25	0 – 50
Al ₂ O ₃	15	6 – 25
NaCl, KCl	35	20 – 50
Carbone	6	1 – 6
Métaux lourds *	-	0,01 – 10
Al métallique	3	2 – 7
PCDD/F	5 µg/kg	3 – 10 µg/kg
Note. * Zn, Pb, Cu, Mn, V, Cr, Ni, Sn (et traces de Co, As, Tl, Be, Sb)		

Tableau 4.13 : Composition typique des poussières sous filtre provenant de la production d'aluminium de seconde fusion

Bien qu'il se peut que le traitement du laitier salé ne soit pas un procédé inclus dans une autorisation pour la production de l'aluminium, les émissions potentiellement importantes de poussières provenant de la phase de concassage d'un procédé hors site est un problème qui peut être pris en compte localement.

4.2.2.1.3 Matières organiques (COV, dioxines) et CO

La mauvaise combustion du combustible ou la teneur en matières organiques de la charge peut entraîner l'émission de matières organiques. La mise en place d'un brûleur et d'un four efficaces munis de dispositifs de contrôle permet d'optimiser la combustion. Les pics de vitesse de combustion des matières organiques incluses doivent être pris en compte si ces dernières sont chargées dans le four. Il a été reporté que le pré-nettoyage des déchets permet de supprimer la majeure partie des matières organiques et améliore le taux de fusion [tm 122, ETSU 1998]. L'utilisation de mélanges chlorés pour le dégazage et pour l'élimination du magnésium ainsi que l'utilisation de chlorures (flux salin) fourniront une source de chlore pour la formation potentielle de dioxines.

Des dispositifs de post-combustion sont utilisés pour détruire les matières organiques produites dans le four ou lors de la phase de prétraitement. Du carbone peut être ajouté et une filtration efficace des

poussières peut être utilisée pour éliminer les matières organiques et les dioxines qui sont associées aux particules.

4.2.2.1.4 Dioxyde de soufre et oxydes d'azote

Ces deux composés sont produits par les systèmes de combustion utilisés dans les fours. Les émissions sont en général peu importantes. Des brûleurs bas NO_x et des combustibles à faible teneur en soufre peuvent être utilisés pour minimiser les émissions. L'utilisation de brûleurs d'oxycombustion peut réduire la formation de NO_x thermiques, mais il est possible que l'enrichissement à l'oxygène produise l'effet inverse en raison de températures de fonctionnement plus élevées. De plus fortes concentrations sont cependant associées à des volumes de gaz et à des quantités totales moins élevés. Les émissions déclarées sont de l'ordre de 10 à 900 grammes de NO_x par tonne de métal selon le four utilisé [tm 116, ALFED 1998].

4.2.2.1.5 Acide fluorhydrique, HCl et chlorures

Le chlore peut être utilisé pour traiter l'aluminium en fusion avant la coulée pour supprimer l'hydrogène et le magnésium. Une utilisation possible des fours tournants est pour l'élimination du magnésium sans utilisation supplémentaire de chlore. Si un excès de chlore est utilisé, il peut être émis sous forme de chlorure d'aluminium qui peut s'hydrolyser au contact de l'air pour produire du HCl. Certains sites utilisent des épurateurs par voie humide et d'autres utilisent des épurateurs par voie sèche ou semi-sèche pour éliminer ces composés. Leur formation peut être réduite au maximum par un bon contrôle et par l'utilisation de mélanges de chlore et de gaz inertes. L'utilisation de fondants salins dans un four de fusion peut également entraîner l'émission de fumées très fines contenant des chlorures de métaux. L'utilisation de fluorures pour l'élimination du magnésium ou comme fondant peut entraîner le dégagement d'acide fluorhydrique et de fluorures en petites quantités.

4.2.2.1.6 Récapitulatif des émissions dans l'air

Émissions	Plage de valeurs
Particules - mg/Nm^3	< 5 – 50
HF - mg/Nm^3	< 5
Chlorures - mg/Nm^3	< 5
HCl - mg/Nm^3	3 – 40
SO_2 - mg/Nm^3	15 – 530
NO_2 - mg/Nm^3	40 – 420
Dioxines – ng/Nm^3	< 0,1 – 1
COV – mg/Nm^3	10 – 57
Consommation d'énergie (MJ/t de copeaux)	3 500 – 5 200

Tableau 4.14 : Séchage des tournures

Émissions	Plage de valeurs
Particules - mg/Nm^3	< 1 – 35
HF - mg/Nm^3	0,1 – 5
Chlorures - mg/Nm^3	1 – 5
HCl - mg/Nm^3	0,1 – 40
Dioxines - ng/Nm^3	< 0,1 – 1
Consommation d'énergie (MJ/t)	2 000 – 8 000

Tableau 4.15 : Four de fusion à induction (avec dépollution)

Émissions	Plage de valeurs
Particules - mg/Nm ³	1 – 30
HF - mg/Nm ³	0,1 – 5
Chlorures - mg/Nm ³	<1 – 5
HCl - mg/Nm ³	0,1 – 40
SO ₂ - mg/Nm ³	5 – 520
NO ₂ – mg/Nm ³	50 – 450
Dioxines – ng/Nm ³	< 0,1 – 1
COV – mg/Nm ³	5 – 90
Consommation d'énergie (MJ/t)	4 000 – 12 000

Tableau 4.16 : Four de fusion tournant (avec dépollution)

Émissions	Plage de valeurs
Particules - mg/Nm ³	< 0,1 – 35
HF - mg/Nm ³	0,1 – 5
Chlorures - mg/Nm ³	< 1 – 5
HCl - mg/Nm ³	0,5 – 40
SO ₂ - mg/Nm ³	0,5 – 515
NO ₂ - mg/Nm ³	15 – 450
Dioxines – ng/Nm ³	< 0,1 – 1
COV – mg/Nm ³	2 – 55
Consommation d'énergie (MJ/t Al)	3 300 – 8 000

Tableau 4.17 : Four de fusion réverbère et four de fusion à puits latéral (avec dépollution)

Émissions	Plage de valeurs
Particules - mg/Nm ³	< 5 -50
HF - mg/Nm ³	< 5
Chlorures - mg/Nm ³	1 – 5
HCl - mg/Nm ³	30 – 40
SO ₂ - mg/Nm ³	10 – 530
NO ₂ - mg/Nm ³	20 – 420
Dioxines – ng/Nm ³	< 0,1 – 1
COV – mg/Nm ³	5 – 57
Consommation d'énergie (MJ/t)	2 300 – 3 800

Tableau 4.18 : Four de fusion à sole inclinable (avec dépollution)

4.2.2.2 Émissions dans l'eau

La production d'aluminium à partir de matières premières secondaires est essentiellement un procédé sec. Les rejets d'eaux usées sont généralement limités à l'eau de refroidissement qui est souvent renvoyée dans le procédé et aux eaux de ruissellement de surface et des toits. Les eaux de ruissellement peuvent être contaminées par le stockage à l'air libre de matières premières telles que les déchets huileux et les solides déposés. Les valeurs typiques de cette contamination sont inférieures à

0,03 kg/tonne d'aluminium pour les solides en suspension. De plus, des quantités considérables d'eaux usées peuvent être rejetées lorsque des systèmes par voie humide sont utilisés pour le contrôle de la pollution de l'air.

4.2.2.3 Résidus et déchets de procédé

Les résidus d'écémage provenant des procédés de maintien et de traitement représentent 15 à 20 kg par tonne d'aluminium produite. Ce matériau contient une quantité importante d'aluminium et le prétraitement des résidus d'écémage par compression ou par refroidissement sous une couverture de gaz inerte réduit l'oxydation. Pendant le stockage, les résidus d'écémage peuvent réagir avec l'humidité (présente dans l'air) pour produire de l'ammoniac et d'autres gaz. Les résidus d'écémage sont utilisés comme matière première dans d'autres parties de l'industrie de l'aluminium de deuxième fusion et sont parfois prétraités par concassage et par classification par l'air afin de séparer l'aluminium de l'oxyde d'aluminium.

Les filtres usagés provenant du traitement du métal sont habituellement mis en décharge. Dans certains cas, lorsque du bicarbonate de soude est utilisé pour le traitement des gaz, des résidus solides peuvent être récupérés avec le fondant salin [tm 2, MIP Al 1993 ; tm 33, Mantle 1988 ; tm 145, Winter 1998]. Alternativement, les poussières sous filtre peuvent subir un traitement thermique afin de détruire les dioxines.

Les garnissages et les poussières provenant du four peuvent être récupérés dans les procédés de traitement du laitier salé ou mis en décharge.

Résidu	Origine	Volume	Traitement	Commentaires sur le traitement
Laitier salé	Fusion dans un four rotatif à tambour	Jusqu'à 500 kg/t Al	Récupération au moyen de techniques de dissolution et cristallisation. Production de substances réutilisables dans la mesure du possible. Granulés d'aluminium, sels mélangés, Al_2O_3 .	Destiné à éviter la mise en décharge.
Poussières sous filtre	Traitement des effluents gazeux	Jusqu'à 35 kg/t Al (0,1 – 10 kg/t Al*)	Mise en décharge avec prétraitement ou site souterrain. En partie reconditionné avec du laitier salé ou utilisé dans l'industrie sidérurgique.	Interdiction de la mise en décharge de surface dans certains pays. Traitement thermique possible (neutralisation avec du $NaHCO_3$ ou du $Na_2CO_3 \rightarrow$ utilisation de laitier salé)
Garnissages de four	Four de fusion	~ 2 kg/t Al	Possibilité de reconditionnement avec des résidus d'écramage, sinon lixiviation + mise en décharge.	Aucune mise en décharge de surface dans certains pays. Production de composés de moulage par injection signalés.
Résidus d'écramage	Tous les fours n'utilisant pas de sel. Nettoyage du four de fusion, des fonderies.	~ 25 kg/t Al 40 – 80 kg/t Al*)	Fusion dans un four rotatif. Récupération, granulés utilisées dans un four rotatif à tambour, poussières de scories utilisées pour la récupération du laitier salé.	Destiné à éviter la mise en décharge.
Note. *en utilisant un four à puits fermé ** Produits non métalliques (proportions d'oxydes provenant de déchets d'Al)				

Tableau 4.19 : Résidus typiques générés par la production d'aluminium de deuxième fusion

Emissions	Plage de valeurs
Particules (mg/Nm^3)	10 – 40
* Poussières (kg/t)	300 – 700
Consommation d'énergie (MJ/t)	300 – 800
Note. * La quantité de poussières dépend de la teneur en métaux des résidus d'écramage d'origine.	

Tableau 4.20 : Préparation des résidus d'écramage

Le fondant salin breveté est un mélange de NaCl, de KCl et de fluorure de calcium. Certains fluorures peuvent également être ajoutés jusqu'à hauteur de 5 %. Lorsque le fondant usagé est vidangé hors du four (il est alors appelé laitier salé), il contient de grandes quantités d'oxyde d'aluminium, dont le fondant a séparé des matières premières. Jusqu'à 8-10 % du poids total du laitier salé est constitué d'aluminium métallique. Les chlorures d'aluminium, de sodium et de potassium peuvent être récupérés afin d'être réutilisés au moyen de procédés de séparation et de cristallisation. Dans certaines usines, la partie oxydée peut être vendue après une étape de lavage ou être utilisée comme matériau pour combler les décharges.

Contenu	Valeur typique (%)	Plage de valeurs (%)
Al métallique	8	5 – 20
Parties solubles dans l'eau*	37	20 – 40
Parties non solubles dans l'eau **	55	45 – 75
PCDD/F	5 ng/kg	< 10 ng/kg
Note : * Sels solubles dans l'eau. ** Oxydes métalliques, métaux non récupérés et sels insolubles.		

Tableau 4.21 : Composition typique du laitier salé

Émissions	Plage de valeurs
Particules (mg/Nm ³)	15 – 40
Ammoniac (mg/m ³)	30 – 40
Phosphine (mg/m ³)	0,1 – 0,5
Sulfure d'hydrogène (ppm)	50 – 100
Consommation d'énergie (MJ/t)	300 - 800

Tableau 4.22 : Émissions dans l'air généralement captées lors du recyclage du laitier salé (hors gaz émis par la chaudière, le cas échéant)

Les émissions fugitives de poussières provenant du concassage du laitier salé peuvent être considérables.

4.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les principaux procédés et les procédés associés.

Des techniques utilisées par d'autres secteurs sont également applicables, notamment celles liées à l'élimination des goudrons et des HAP.

Les techniques à prendre en compte site par site sont fortement influencées par les matières premières disponibles sur un site, par le procédé mis en place et, notamment, par le type et la variabilité des matières premières secondaires. Par exemple, les métaux qu'elles contiennent peuvent s'avérer cruciaux pour le choix du procédé.

Les procédés appliqués décrits ci-dessus sont appliqués à une large gamme de matières premières de deuxième fusion de quantités et compositions variables et sont également représentatifs de ceux utilisés dans le monde. Des procédés primaires ont récemment été développés et le contrôle des conditions d'exploitation ainsi que les techniques d'alimentation des cuves électrolytiques ont été améliorées tout comme les systèmes de confinement et d'extraction. Les techniques ont été développées par les entreprises de ce secteur afin de prendre ceci en considération.

4.3.1 Procédés de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux

Le stockage des matières premières dépend de la nature du matériau décrit ci-dessus. Les poussières fines sont stockées dans des bâtiments fermés, dans des silos ou dans des emballages étanches. Les matériaux non pulvérulents et non solubles sont stockés en tas à l'air libre et les grosses pièces sont stockées individuellement à l'air libre.

4.3.1.1 Matières premières primaires

Les matières premières sont la bauxite, la soude caustique, la chaux, les mélanges chlorés, l'alumine, les fondants, les matériaux anodiques, les matériaux de deuxième fusion et le combustible. Les autres matériaux importants sont les produits, les résidus d'écémage, les laitiers et les résidus de procédé. Les aspects importants sont la prévention des fuites de poussières et de matériaux humides, le captage et le traitement des poussières et des liquides et le contrôle des intrants et des paramètres de fonctionnement des procédés de manutention et de chargement. Les problèmes spécifiques à ce groupe sont :

- La nature potentiellement pulvérulente de la bauxite, de l'alumine et des fondants rend l'utilisation de systèmes de stockage, de manutention et de traitement fermés appropriée en pareil cas. Des convoyeurs fermés, des systèmes de transfert pneumatiques et des silos de stockage sont des techniques à envisager.
- Des systèmes de collecte et de dépollution peuvent être utilisés au cours de ce procédé en raison de la poussière générée par certaines opérations de fraisage et de séparation.
- Des filtres à manches ou en céramique éliminent plus efficacement les poussières que des filtres électrostatiques.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Charbon ou coke	Aires couvertes, silos	Convoyeurs couverts. Pneumatique.		
Fuel, autres combustibles liquides, brai	Cuves ou fûts placés dans un endroit doté d'un dispositif de confinement.	Conduites sécurisées ou système manuel.	Site de stockage et conduites chauffées.	Ventilation en retour des gaz déplacés.
Bauxite et alumine	Stockage dans un endroit fermé si formation de poussières	Manutention dans un endroit fermé avec dispositif de collecte des poussières. Convoyeur couvert.		
Chlore gazeux ou mélanges contenant du chlore	Récipients sous pression agréés	Méthodes agréées		
Produits – brames, billettes, bandes et lingots	Stockage à ciel ouvert			
Résidus de procédé à récupérer (résidus d'écémage, par exemple)	Stockage couvert ou fermé en fonction de la quantité de poussières générée.	En fonction des conditions		Laitier salé et résidus d'écémage maintenus au sec. Système d'évacuation approprié.
Déchets à mettre en décharge	Aires couvertes ou fermées voire étanches (fûts) en fonction du matériau	En fonction des conditions		Système d'évacuation approprié.

Tableau 4.23 : Méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux primaires utilisées pour la production d'aluminium

Les résidus d'écémage et autres résidus métalliques destinés à être récupérés à l'extérieur du site devront de préférence être refroidis dans une atmosphère inerte et stockés à l'abri de l'humidité ou de toute autre manière adaptée en fonction du matériau utilisé (réduction de taille, par exemple).

4.3.1.2 Matières premières secondaires

Il existe une grande variété de matières premières secondaires, des fines poussières aux grosses pièces uniques. La teneur en métal varie pour chaque type de matériau, tout comme la teneur en autres métaux et en agents contaminants.

Les matières premières secondaires contenant de l'huile ou des composés solubles dans l'eau sont stockées à l'abri. Les résidus d'écémage peuvent être hydrolysés afin de produire de l'ammoniac gazeux. Par conséquent, les techniques utilisées pour le stockage, la manutention et le prétraitement varieront selon la taille du matériau et le degré de contamination. Ces facteurs varient d'un site à l'autre et les techniques abordées dans la section 2.4 seront appliquées en fonction du site et du matériau utilisé. Les problèmes spécifiques rencontrés par ce groupe sont les suivants :

- On procède souvent à un prétraitement afin d'éliminer l'huile ou les revêtements ou afin de séparer l'aluminium des oxydes. L'élimination de l'huile et des revêtements par des moyens thermiques (dans un sécheur de tournures, par exemple) est une technique à prendre en compte.

- Les autres phases de prétraitement peuvent inclure une granulation, une séparation par media filtrant et une séparation magnétique destinées à éliminer la contamination par le fer. Ce sont des techniques à prendre en compte.
- Le traitement des résidus d'écémage au moyen de procédés de fraisage et de meulage associés à un système d'extraction et de dépollution des poussières efficace est également une technique à prendre en compte. Les poussières fines générées par ces procédés peuvent être traitées afin de récupérer les autres métaux qu'elles contiennent.
- L'utilisation de procédés de séparation pneumatique par densité ou autres techniques de séparation par densité est une technique à prendre en compte.
- Le stockage et la manutention des poussières fines de manière à prévenir toute émission de poussières est une technique à prendre en compte.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Combustibles et autres huiles	Cuves ou fûts placés dans des endroits dotés d'un dispositif de confinement	Conduites sécurisées ou système manuel	Stockage et pipelines chauffés	Ventilation en retour des gaz déplacés
Fondants et sels	Lieu de stockage fermé (silo) en cas de formation de poussière	Convoyeurs fermés dotés d'un dispositif de collecte des poussières		
Poussières fines (résidus d'écémage), etc.	Lieu de stockage fermé en cas de formation de poussière	Fermée avec dispositif de collecte des poussières	Broyage et séparation par densité	
Copeaux	Aires couvertes si huile soluble ou émulsifiée	Chargeur mécanique	Sécheur de copeaux, centrifugeage	Collecte de l'huile, si nécessaire
Poussières grossières	Aires ouvertes ou couvertes	Chargeur mécanique	Sécheur de copeaux, si nécessaire	Collecte de l'huile, si nécessaire
Morceaux (matières premières ou laitier)	Ouvert	Chargeur mécanique		Collecte de l'huile, si nécessaire
Éléments entiers, feuilles et plaques	Aires ouvertes ou couvertes	Chargeur mécanique		Collecte de l'huile, si nécessaire
Chlore gazeux ou mélanges contenant du chlore	Récipients sous pression agréés	Méthodes agréées		
Produits – bandes, billettes, plaques et lingots	Stockage à l'air libre		Préchauffage	
Résidus de procédé à récupérer (résidus d'écémage, laitier salé et revêtements, par exemple)	Stockage fermé ou couvert si formation de poussières	En fonction des conditions	Séparation par broyage et/ou dissolution – Potentiellement très pulvérulent	Les résidus d'écémage et le laitier salé doivent être maintenus au sec. Système d'évacuation approprié.
Déchets à mettre en décharge	Aires couvertes ou fermées ou conteneurs couverts pour le transport en fonction du matériau	En fonction des conditions		Système d'évacuation approprié

Tableau 4.24 : Méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux de deuxième fusion utilisés pour la production d'aluminium

4.3.2 Production d'alumine à partir de bauxite

Le procédé Bayer est la technique standard à prendre en compte. Ce procédé comporte plusieurs variantes qui devront être prises en compte lors de la détermination des MTD. Ces variantes sont les suivantes : -

- Manutention, concassage-broyage de la bauxite, de la chaux et des autres matériaux de manière à limiter les émissions de poussières.
- Conception et utilisation d'autoclaves permettant de réduire la consommation d'énergie (ex. : utilisation d'autoclaves tubulaires et d'échangeurs de chaleur thermiques à l'huile afin de pouvoir récupérer un maximum de chaleur et utiliser une température de digestion plus élevée).
- Utilisation de fours de calcination à lit fluidisé dotés d'un système de préchauffage afin de pouvoir utiliser le contenu calorifique des effluents gazeux. Utilisation de filtres à manches ou de filtres électrostatiques pour éliminer l'alumine calcinée et les poussières.
- Mise en décharge des boues rouges dans des zones étanches et réutilisation des eaux de transport et de surface provenant des bassins.

4.3.3 Procédés de fusion de l'aluminium de première fusion

Les cuves d'électrolyse détaillées dans la section consacrée aux techniques utilisées sont des techniques à prendre en compte et à associer aux dispositifs suivants de manière à réduire au maximum l'impact du procédé sur l'environnement :

- Alimentation automatique en alumine par points multiples et automatiques.
- Contrôle informatisé du procédé d'électrolyse basé sur les bases de données des cuves actives et surveillance des paramètres de fonctionnement des cuves.
- Cuves équipées d'un système de hottes de captage complet relié à un système de filtration et de rejet des gaz séparé. Utilisation de couvercles de cuve solides et de vitesses d'extraction adéquates tenant compte de l'évaporation du fluorure et de la combustion du carbone.
- Efficacité de collecte à long terme des fumées provenant des cuves compris entre 98 et plus de 99 %. Si l'efficacité de la collecte est inférieure à ces valeurs, la collecte et le traitement des gaz émis devront être pris en compte.
- Minimisation du temps nécessaire au remplacement des anodes et des autres actions nécessitant le retrait des couvercles des cuves. Refroidissement des mégots d'anode dans une enceinte fermée. Utilisation d'un système programmé pour l'exploitation et l'entretien des cuves.
- Pour les cuves à anode Søderberg : - Système de hottes de captage complet au-dessus de l'anode relié à un dispositif d'évacuation des gaz séparé et à un épurateur à alumine par voie sèche ou : - Haut d'anode sec associé à de la pâte pour trou de goujon et augmentation de la hauteur de l'anode (en fonction de l'efficacité constatée). Utilisation de brûleurs bien conçus et bien entretenus pour l'incinération du CO, des HAP à faible masse moléculaire et autres hydrocarbures présents dans les gaz émis par la cuve, si nécessaire.
- Epuration des fluorures et du HF présents dans les fumées provenant des cuves au moyen d'alumine suivi par une élimination des poussières dans un système de filtre à manches ou une combinaison de ce dernier avec un épurateur par voie humide pour atteindre une élimination minimale de 99,9 % de la quantité totale de fluorures. L'alumine devra être réutilisée dans le procédé.
- Si l'élimination du soufre est réalisée au moyen d'un système d'épuration par voie humide, ce système devra être utilisé en association avec un système permettant d'éliminer les fluorures, le HF et les goudrons.
- S'il y a une unité de fabrication d'anodes combinée, utilisation d'un épurateur à alumine et d'un système de filtre à manches ou de filtres revêtus de carbone afin d'éliminer les émissions de goudrons provenant des phases de concassage, de mélange et de cuisson. Utilisation de l'alumine dans le procédé électrolytique.

- Utilisation de méthodes de traitement efficaces et éprouvées dans l'unité de fabrication de barres afin de récupérer les fluorures et le carbone. Collecte des fumées contenant du fluorure provenant du procédé de lavage et de la fusion des composants en acier.
- Utilisation de carbone à faible teneur en soufre pour les anodes ou la pâte anodique.
- Utilisation d'une injection de gaz ou de fondant rotative pour les fours de maintien.

EXEMPLE 4.01 CONTRÔLE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES CUVES D'ÉLECTROLYSE

Description : - La température du bain, la tension et le courant électrique sont les seuls paramètres du procédé d'électrolyse pouvant être mesurés de manière directe. Par conséquent, le contrôle du procédé d'électrolyse est basé sur les données provenant de ce nombre limité de paramètres. Le développement des microprocesseurs a permis aux ordinateurs modernes de simuler le processus électrolytique en calculant des modèles complexes portant sur la cinétique dynamique et les champs magnétiques, basés sur les informations limitées disponibles. On obtient ainsi un meilleur contrôle du procédé et un fonctionnement plus souple du dispositif d'électrolyse. Un bon fonctionnement du procédé permettra généralement de réduire les quantités de fluorures et de poussières émises.

Principaux bénéfices environnementaux : Un contrôle amélioré du procédé peut également être utilisé afin de réduire les émissions de PFC. Les effets d'anode à l'origine des émissions de PFC sont directement liés à de faibles concentrations en alumine. La concentration en alumine de l'électrolyte ne peut être mesurée directement en raison de la nature très agressive de ce milieu. Par conséquent, les effets d'anode ont été utilisés comme méthode additionnelle pour contrôler la concentration en alumine. Les effets d'anode apparaissent lorsque la concentration en alumine devient inférieure à 1 % et permettent alors d'identifier une concentration spécifique en alumine. En simulant l'électrolyse, les ordinateurs modernes sont capables de calculer et de corriger la concentration en alumine. La correction de la concentration en alumine de l'électrolyte réduit le nombre d'effets d'anode. Toutefois, des effets d'anode sont toujours nécessaires pour procéder à des ajustements périodiques de la concentration en alumine simulée. Par conséquent, ce contrôle amélioré du procédé est souvent couplé à un système de désactivation automatique des effets d'anode. Ce système utilise de l'air comprimé pour perturber automatiquement la couche gazeuse située au-dessous de l'anode qui apparaît avec les effets d'anode.

Données opérationnelles : Les émissions de PFC peuvent être réduites grâce à un contrôle amélioré du procédé. Par exemple, des cuves d'électrolyse de type CWPB dotées d'un point d'alimentation central peuvent généralement fonctionner avec une fréquence d'effets d'anode comprise entre 0,2 et 0,5 effet d'anode par cuve et par jour, soit des émissions de PFC comprises entre 0,05 et 0,1 kg par tonne d'aluminium. Lorsque des ordinateurs modernes sont utilisés pour contrôler le procédé, le nombre d'effets d'anode peut encore être réduit jusqu'à une fréquence inférieure à 0,1 effet d'anode par cuve et par jour. Cela permet de réduire les émissions de PFC à moins de 0,03 kg par tonne d'aluminium.

Effets croisés : Le contrôle amélioré du procédé d'électrolyse permet une réduction de la consommation d'électricité. La conversion en alimentation ponctuelle est associée à des émissions de fluorures plus élevées dans les gaz provenant des cuves et influe sur la taille du système d'épuration par voie sèche des gaz provenant de la cuve.

Aspects économiques : Coût de la conversion des installations Söderberg ou CWPB classiques en systèmes d'alimentation ponctuelle dotés de dispositifs de contrôle du procédé : de 100 à 250 € par tonne de capacité annuelle.

Applicabilité : Toutes les installations de type Söderberg et CWPB disposent de dispositifs informatiques de contrôle, mais il existe des différences au niveau de la technologie utilisée et de la philosophie d'utilisation. Des opportunités d'optimisation existent.

Exploitations de référence : Norvège, France, Pays-Bas.

Documents de référence : [tm 100, NI Al 1998]

EXEMPLE 4.02 UTILISATION D'UN DISPOSITIF D'ÉPURATION PAR VOIE SÈCHE POUR LA PRODUCTION D'ALUMINIUM DE PREMIÈRE FUSION

Description : - L'épuration par voie sèche est basée sur la récupération des fluorures par adsorption sur alumine utilisée comme agent d'épuration. L'alumine fraîche est introduite dans un réacteur avec l'air de procédé provenant de l'électrolyse. La majeure partie de l'adsorption des fluorures gazeux (acide fluorhydrique) sur l'alumine a lieu dans ce réacteur. Le mélange air de procédé / alumine entre alors dans un système d'élimination des poussières où l'alumine enrichie en fluorures est séparée de l'air de procédé. En règle générale, des filtres à manches sont utilisés pour éliminer les poussières. Une adsorption supplémentaire est obtenue dans ces filtres à manches dans la mesure où le gâteau de filtration se forme sur les filtres. L'alumine éliminée de l'air de procédé est utilisée comme source d'alumine pour l'électrolyse (appelée « source d'alumine secondaire »).

L'objectif principal du système d'épuration par voie sèche est de supprimer les fluorures et la poussière présents dans le gaz de procédé. Une adsorption supplémentaire du SO₂ sur l'alumine se produira également. Ce SO₂ est renvoyé dans le procédé d'électrolyse par le dispositif d'alimentation en alumine secondaire. Par conséquent, ce SO₂ capté par l'alumine sera entièrement rejeté par le procédé d'électrolyse lors du chauffage de l'alumine. Ainsi, le système d'épuration par voie sèche ne permet pas de réduire les émissions de SO₂.

Principaux bénéfices environnementaux : Le système d'épuration par voie sèche avec élimination des poussières atteint des taux d'élimination très élevés, supérieurs à 99,9 % de la quantité totale de fluorures. Le taux de traitement exact dépend de la conception de l'équipement, des propriétés de l'alumine et de la flexibilité et de l'entretien de l'usine. Les installations d'épuration par voie sèche les plus efficaces fonctionnant avec de l'alumine à surface spécifique élevée et avec recyclage multiple de l'alumine dans le réacteur atteignent des taux d'efficacité moyens supérieurs à 99,9 % pour les fluorures totaux.

Données opérationnelles : Un système d'épuration par voie sèche est capable d'atteindre les niveaux d'émission suivants : fluorures gazeux (acide fluorhydrique) : de 0,03 à 0,2 kg par tonne d'aluminium ; fluorures totaux : de 0,05 à 0,3 kg par tonne d'aluminium ; poussières : de 0,2 à 0,5 kg par tonne d'aluminium.

Effets croisés : L'épuration par voie sèche requiert une quantité importante d'énergie (environ 350 kWh par tonne d'aluminium). Aucun autre effet croisé n'a été identifié dans la documentation disponible.

Aspects économiques : On estime les coûts d'investissement à 5 millions d'euros pour l'amélioration de l'efficacité d'épuration d'un système d'épuration par voie sèche existant doté d'un dispositif d'élimination des poussières. Sur la base des données fournies par des installations anonymes, les coûts d'investissement liés aux nouveaux systèmes d'épuration par voie sèche avec dispositif d'élimination des poussières oscillent entre 10 et 50 millions d'euros. Ces mêmes installations anonymes estiment que les coûts d'exploitation sont compris entre 5 et 15 € par tonne d'aluminium.

Applicabilité : La plupart des installations.

Exploitations de référence : La grande majorité des usines d'aluminium primaire utilisent un dispositif d'épuration par voie sèche utilisant de l'alumine et un dispositif d'élimination des poussières supplémentaire constitué de filtres à manches pour contrôler leurs émissions. Dans certains cas, des filtres électrostatiques sont utilisés pour l'élimination des poussières.

Documents de référence : [tm 100, NL Al 1998]

EXEMPLE 4.03 UTILISATION D'UN SYSTÈME D'ÉPURATION PAR VOIE HUMIDE POUR LA PRODUCTION D'ALUMINIUM PRIMAIRE

Description : Les émissions causées par l'électrolyse peuvent être dépolluées par épuration par voie humide. L'épuration par voie humide sera généralement utilisée comme méthode de dépollution supplémentaire après une épuration par voie sèche. L'épuration par voie humide supplémentaire est principalement utilisée pour éliminer le SO_2 , mais elle permet également de réduire les émissions de fluorures et, dans une moindre mesure, de poussières. L'épuration par voie humide peut être appliquée aux gaz provenant des cuves d'électrolyse et aux gaz de ventilation du hall d'électrolyse.

Le procédé d'épuration par voie humide est basé sur le principe selon lequel les polluants sont absorbés et transformés par le système d'épuration. Divers agents absorbants peuvent être utilisés comme moyen d'épuration. Dans l'industrie de l'aluminium, on utilise souvent de l'eau de mer ainsi que des utilisations individuelles d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de carbonate de sodium (Na_2CO_3). Le SO_2 est converti en sulfates aqueux par ces absorbants. Une autre possibilité consiste à convertir le SO_2 en gypse grâce à des agents absorbants contenant de la chaux (chaux hydratée, castine ou mélanges d'hydroxydes de calcium et de magnésium).

Le moyen d'épuration doit être renouvelée et l'absorbant usagé doit être évacué pour permettre une absorption et une conversion continues.

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination du SO_2 et des autres gaz acides afin de réduire l'impact local, régional et transfrontalier de ces gaz.

Données opérationnelles : Des taux d'élimination du SO_2 compris entre 80 et plus de 90 % ont été enregistrés pour les épurateurs par voie humide. Les émissions de SO_2 peuvent être réduites à des concentrations comprises entre 25 et 50 mg/Nm^3 et à des charges comprises entre 0,6 et 4 kg de SO_2 par tonne d'aluminium. En outre, le lavage humide supplémentaire entraîne une réduction des émissions de fluorures et de poussières. Des niveaux d'émission de fluorures totaux (sous forme de gaz et de particules) de 0,02 à 0,2 kg par tonne d'aluminium ont été constatés lorsqu'un lavage humide est appliqué comme moyen de dépollution supplémentaire. Dans ces situations, les émissions de poussières ont été réduites à un niveau compris entre 0,1 et 0,3 kg par tonne d'aluminium.

Effets croisés : Tous les systèmes d'épuration par voie humide nécessitent que les polluants absorbés et transformés soient évacués du système. Les rejets sont effectués sous forme d'eaux usées (eau de mer), de déchets liquides (NaOH et Na_2CO_3) ou de gypse.

- c) **Eau de mer :** Les effluents provenant des laveurs à l'eau de mer (de 20 à 300 m^3 par tonne d'aluminium) d'une usine de production d'aluminium sont légèrement acides et contiennent des fluorures, des sulfures/sulfates, des matières en suspension et des traces de contamination (nickel, par exemple) et sont pauvres en oxygène. Par conséquent, les usines utilisant de l'eau de mer seront généralement équipées d'installations permettant l'élimination des particules conformément à la législation nationale relative au rejet de ces eaux usées dans la mer. Le traitement des eaux usées inclut généralement une floculation et une sédimentation. Le traitement des eaux usées génère une boue qui doit être éliminée. L'eau de mer utilisée dans les épurateurs par voie humide peut également être traitée au moyen de biocides qui seront également rejetés dans la mer. L'épuration par voie humide à l'eau de mer nécessite une consommation d'énergie supplémentaire de l'ordre de 150 kWh par tonne d'aluminium.
- d) **NaOH :** Les épurateurs utilisant du NaOH doivent rejeter un effluent concentré (environ 1 m^3 par tonne d'aluminium). Les polluants présents dans ces effluents peuvent être comparés aux polluants présents dans l'eau de mer rejetée, mais présentent des concentrations plus élevées. Néanmoins, les effets sur l'environnement aquatique demeurent.

Aspects économiques : Des prévisions de coûts ont été faites pour l'épuration par voie humide supplémentaire des émissions du procédé. Ces estimations portent sur les systèmes d'épuration utilisant de l'eau de mer ainsi que pour ceux utilisant du NaOH .

- e) **Eau de mer** : les coûts d'investissement identifiés sont compris entre 9 et 36 millions d'euros. Basés sur la capacité de production annuelle, les coûts d'investissement sont compris entre 75 et 250 € par tonne de capacité. Le coût total annuel identifié est compris entre 2,6 et 7,5 millions d'euros. Basé sur la capacité de production annuelle, le coût total annuel est compris entre 40 et 70 € par tonne d'aluminium.
- f) **NaOH** : les coûts d'investissement identifiés sont compris entre 12 et 40 millions d'euros. Basés sur la capacité de production annuelle, les coûts d'investissement sont compris entre 100 et 250 € par tonne de capacité.

Le coût total annuel identifié est compris entre 4 et 7 millions d'euros. Basé sur la capacité de production annuelle, le coût total annuel est compris entre 100 et 200 € par tonne d'aluminium.

Applicabilité : Cette technique convient lorsque les concentrations en dioxyde de soufre dans l'air excèdent les normes de qualité de l'air locales, régionales ou transfrontalières. Des techniques d'épuration similaires peuvent également être utilisées pour éliminer les fluorures, le dioxyde de soufre et les HAP de l'air de ventilation du hall d'électrolyse provenant de certaines installations de types SWPB et Søderberg. Les coûts d'investissement et d'exploitation sont différents dans ce cas.

Exploitations de référence : Au niveau européen, l'épuration par voie humide de l'air de procédé provenant de l'électrolyse n'est utilisée qu'en Scandinavie. Toutes les usines norvégiennes et suédoises sont équipées d'un système d'épuration par voie humide. Certaines usines de type Søderberg ont également installé un système d'épuration de l'air de ventilation des cuves. Ces épurateurs par voie humide sont principalement utilisés dans les usines d'aluminium situées en bord de mer et utilisent l'eau de mer comme moyen d'épuration. En outre, une usine norvégienne a été identifiée comme utilisant du NaOH, tandis qu'aux Etats-Unis une installation a été identifiée comme utilisant du Na_2CO_3 .

Documents de référence : [tm 100, NL Al 1998]

4.3.4 Fours de fusion de deuxième fusion

Plusieurs des techniques décrites dans les sections 2.7 et 2.8 peuvent être utilisées pour l'extraction et la dépollution des fumées et pour les systèmes de régulation du procédé utilisés par ces fours. Ces techniques ne sont pas couramment utilisées par toutes les installations au moment de la rédaction de ce document. Les fours décrits comme étant des techniques disponibles constituent les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Les dispositifs suivants constituent des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD applicables aux fours.

- Sélection de charges adaptées au type de four et de système de dépollution et transfert des matières premières inadaptées vers d'autres exploitants utilisant un équipement conçu pour pouvoir les utiliser de manière à :
 - g. Prévenir l'utilisation de sel, lorsque cela est possible, de manière à obtenir un rendement de production pratique optimal ;
 - h. Réduire au maximum l'utilisation de sel dans les autres cas ;
 - i. Récupérer autant de sous-produits que possible (ex.: récupération de la totalité du laitier salé produit).

Le but est de limiter au maximum la mise en décharge des déchets. Si on a recours à la mise en décharge, un système sûr, étanche et en circuit fermé est nécessaire [tm 206, TGI 1999].

- Si possible, utilisation d'un engin de chargement étanche ou d'un système d'étanchéité équivalent.
- Utilisation de brûleurs alimentés à l'oxygène lorsque l'existence de bénéfices pour l'environnement et en matière de consommation d'énergie est établie.
- Utilisation de capotage, de hottes et de systèmes ciblés d'extraction des fumées afin de capter les émissions fugitives à chaque fois que cela est possible du point de vue pratique.

- Elimination des huiles et des matières organiques au moyen d'un procédé de séchage des tournures, de centrifugation ou d'autres méthodes d'élimination de revêtement avant la phase de fusion, à moins que le four et le système de dépollution ne soient spécialement conçus pour s'adapter à la teneur en matières organiques.
- Utilisation de fours à induction à creuset pour les quantités relativement faibles de métal propre.
- Utilisation de chambres de post-combustion lorsque cela est nécessaire pour éliminer le carbone organique, y compris les dioxines.
- Injection de carbone et de chaux de manière à réduire la quantité de gaz acides et de carbone organique, y compris les dioxines.
- Récupération de la chaleur à chaque fois que cela est possible.
- Utilisation d'une technologie de filtration appropriée (filtres à manches ou en céramique, par exemple).

L'utilisation de systèmes de pompage du métal, de systèmes de chargement étanches et de systèmes intelligents de régulation de la collecte des fumées doivent être envisagées pour les procédés existants en fonction du type de four. Le tableau suivant donne un aperçu des avantages et des inconvénients des fours de fusion destinés à la production d'aluminium de deuxième fusion.

Type de four	Variante	Application principale	Avantages	Inconvénients	Collecte des gaz	Commentaires
Réverbère	Standard	Fusion de plus gros volumes de déchets propres et de matière chargée primaire	<ul style="list-style-type: none"> Grande capacité (100 t). Peu de restrictions liées à la taille des charges Faible utilisation de laitier salé 	<ul style="list-style-type: none"> Rendement thermique plus faible Restrictions liées aux charges 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Rendements de production plus importants en raison de la qualité de la charge Des pompes à métal en fusion sont parfois utilisées
	À puits latéral	Comme ci-dessus, mais permet une récupération efficace de matière chargée plus fine.	<ul style="list-style-type: none"> Grande capacité. Gamme de matière chargée possible plus étendue. Normalement, pas de laitier salé 	<ul style="list-style-type: none"> Rendement thermique plus faible 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Rendements de production élevés possibles en fonction de la qualité de la charge Des pompes à métal en fusion sont parfois utilisées
	À sole inclinable	Séparation de l'aluminium et de contaminants métalliques à point de fusion plus élevé (fer/acier)	<ul style="list-style-type: none"> Très efficace pour éliminer les agents contaminants possédant un point de fusion élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> Rendement thermique plus faible 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Parfois intégré dans d'autres types de four. Rendement de production dépendant du niveau de contamination.
Tournant	À axe fixe	Recyclage d'une gamme de matériaux plus étendue	<ul style="list-style-type: none"> Aucune restriction liée à la charge Bon rendement thermique Élimination efficace du magnésium Aucun résidu d'écémage produit Grands volumes de charge possibles (> 65 t) 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de fondants salés relativement importante. Il peut y avoir des restrictions liées à la taille de la charge 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Les laitiers salés produits peuvent être retraités
	Inclinable	Cf. ci-dessus.		<ul style="list-style-type: none"> Il peut y avoir des restrictions liées à la taille de la charge 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Tend à être utilisé pour des déchets de qualité inférieure
À induction	À creuset	Fusion de déchets ou de charge primaire plus propres	<ul style="list-style-type: none"> Rendements de production élevés. Pas de gaz de combustion Aucun fondant salin requis Utilisation flexible (procédé continu et discontinu possibles) 	<ul style="list-style-type: none"> Charge relativement petite (< 10 t) Restrictions liées au type de charge Il peut y avoir des restrictions liées à la taille de la charge 	Ouvert, équipé de hottes	
	À canal	Cf. ci-dessus	<ul style="list-style-type: none"> Rendements de production élevés. Pas de gaz de combustion Aucun fondant salin requis 	<ul style="list-style-type: none"> Comme ci-dessus mais capable de fonctionner avec des capacités plus importantes (~20 – 25 t) 	Semi-étanche	
À creuset		Fusion de lingots et de déchets de procédé propres dans des fonderies.	<ul style="list-style-type: none"> Meilleur rendement thermique 	<ul style="list-style-type: none"> _Restrictions liées au type de charge Il peut y avoir des restrictions liées à la taille de la charge 	Semi-étanche	<ul style="list-style-type: none"> Utilisé dans le procédé Meltower

Tableau 4.25 : Récapitulatif des fours de fusion utilisés pour la production d'aluminium de deuxième fusion

Les exemples suivants indiquent comment les fondants salins utilisés peuvent être virtuellement éliminés, réduits en quantité ou finalement récupérés. Chaque option doit être examinée à la lumière de la technologie de procédé utilisée. Chacun de ces items a ses propres avantages et ses propres inconvénients (restrictions en matière de matériau chargé ou de volumes de métal, par exemple) qu'il convient de prendre en compte.

EXEMPLE 4.04 UTILISATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE DU MÉTAL

Description : Four réverbère équipé d'un puits latéral, d'un puits de chargement et d'un système de métal pompé.

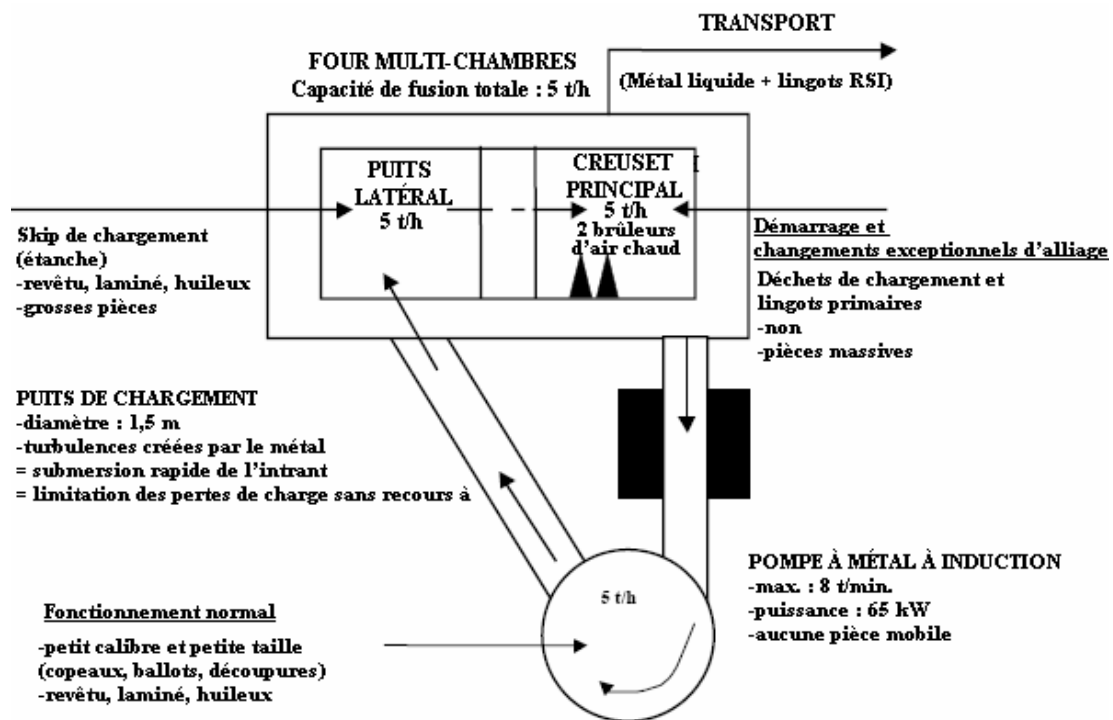


Figure 4.6 : Exemple de système de métal pompé

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination potentielle des fondants salins. Gamme de matériaux plus étendue qu'un four réverbère simple, meilleur captage des gaz provenant du four.

Données opérationnelles : Amélioration du rendement du métal comprise entre 83 et 88 %, réduction des coûts en énergie.

Effets croisés : Réduction de la quantité de déchets produite nécessitant un traitement. Réduction également de la consommation d'énergie et des émissions provenant du four.

Aspects économiques : Coût (1997) d'un four de 30 tonnes et d'un système de pompage électromagnétique : 1 800 000 £ (2,73 millions d'euros). Economies estimées (énergie, meilleur rendement de production, économies de fondant et économies relatives au traitement) : 832 000 £ (1,26 million d'euros) par an. Rentabilisé au bout de 2,2 ans. Coût du système de pompage et du puits de chargement : ~ 300 000 £ (456 000 €).

Applicabilité : - Fours à réverbères nouveaux et rénovés. Ne peut être utilisé avec les procédés en discontinu. D'autres méthodes de pompage peuvent également être utilisées.

Exploitations de référence : Les systèmes de pompage sont largement utilisés dans toute l'Europe.

Documents de référence : [tm 123, ETSU 1998] et [tm 122, McLelan 1998]

EXEMPLE 4.05 LIMITATION DU FONDANT SALIN

Description : Limitation du fondant salin grâce à l'utilisation d'un four tournant inclinable.

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction de la quantité de laitier salin produite de 1,8 à moins de 0,5 kg de sel par kg de contenu non métallique.

Données opérationnelles : Réduction du facteur d'utilisation du sel de 1 – 1,8 à moins de 0,5.

Effets croisés : Réduction de la quantité de déchets produite nécessitant un traitement. Réduction également de la consommation d'énergie et des émissions générées par le procédé de traitement.

Aspects économiques : Inconnus. Coût du four moins les économies liées à l'achat et au traitement du sel. Quatre installations actuellement en fonction sont économiquement viables.

Applicabilité : Fours nouveaux et rénovés. Il existe des restrictions liées à la taille. Ne convient pas pour tous les types de charge.

Exploitations de référence : Des installations utilisent ce système aux Etats-Unis, en Allemagne et au Royaume-Uni.

Documents de référence : [tm 145, Winter 1998].

EXEMPLE 4.06 LIMITATION DU FONDANT SALIN

Description : Limitation de la quantité de déchets générée par le prétraitement des résidus d'écémage. Ces derniers sont concassés et tamisés afin de séparer l'aluminium de l'oxyde. L'aluminium est récupéré dans un four tournant, mais le prétraitement réduit la quantité fondue ainsi que la quantité de sel requise.

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction de la quantité de déchets produite de 118 à 66 kg par 100 kg de résidus d'écémage récupéré.

Données opérationnelles : 100 kg de résidus d'écémage non traités utilisent environ 72 kg de sel pour la fusion et génèrent 45 kg d'aluminium et 118 kg de résidus de laitier salin. Quantité totale de résidus : ~ 118 kg.

100 kg de résidus d'écémage, après prétraitement par concassage et tamisage génèrent 70 kg de granules d'aluminium, 12,5 kg de poussières à traiter, 12,5 kg de matériaux réutilisables et 5 kg de fer. Les 70 kg de granules d'aluminium utilisent 32,5 kg de sel pour la fusion et génèrent 45 kg d'aluminium et environ 54 kg de résidus de laitier salin. Quantité totale de résidus : ~ 66 kg.

Effets croisés : La réduction de la quantité de laitier salin utilisée permet de réduire les émissions de chlorures et de moins recourir au traitement du laitier salin ou à la mise en décharge. Réduction également de la consommation d'énergie et des émissions provenant du procédé en raison de la charge moins importante du four.

Aspects économiques : Inconnus. Coût du concasseur et du tamis moins les coûts liés aux économies réalisés sur les frais de traitement et de mise en décharge. De nombreuses installations équipées de ce système sont économiquement viables.

Applicabilité : - La plupart des résidus d'écémage présentant une teneur élevée en oxydes.

Exploitations de référence : Des installations de ce type sont utilisées en Espagne, en Italie, en Allemagne et au Royaume-Uni.

Documents de référence : - IDALSA 1999.

EXEMPLE 4.07 RÉCUPÉRATION DU LAITIER SALIN

Description : Récupération du laitier salin afin de récupérer l'aluminium, les sels et les oxydes qu'il contient. De gros blocs de laitier salin sont concassés jusqu'à une taille utilisable et des granules d'aluminium sont récupérées par tamisage (généralement jusqu'à 10 %). Le matériau finement concassé est alors dissout dans de l'eau de manière à ce que les chlorures passent en solution et produisent une saumure, laissant l'oxyde d'aluminium insoluble et les particules métalliques d'aluminium les plus fines qui ne sont normalement pas économiquement récupérables en tant que métal. Il existe quelques variantes dans les procédés utilisés : certains utilisent de l'eau froide, puis concentrent la saumure en vue de sa cristallisation tandis que d'autres utilisent de l'eau chaude.

Des gaz se dégagent à partir de la phase de dissolution du procédé. Ils contiennent principalement de l'ammoniac, du méthane, de l'hydrogène et de la phosphine. Il est possible d'utiliser ces gaz comme combustible pour d'autres phases du procédé [tm 116, ALFED 1998]. La saumure est filtrée afin d'en éliminer les oxydes insolubles et la solution est alors envoyée dans l'atelier de cristallisation dans lequel les chlorures de sodium et de potassium initiaux peuvent être récupérés, puis réutilisés comme fondants dans les fours de fusion. Les oxydes contiennent des oxydes de calcium, de magnésium et d'aluminium ainsi que des anions de chlorures, de fluorures, de sulfates et de nitrates. De l'oxyde lavé est utilisé dans l'industrie du ciment. Il a été reporté que des poussières de gaz provenant du traitement des gaz issus de fours de deuxième fusion utilisant du bicarbonate de sodium ont été récupérées au cours du processus de récupération du sel en Autriche et en Espagne.

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction de la quantité de déchets mise en décharge, récupération du sel en vue de sa réutilisation, possibilité de production d'alumine en vue de son utilisation dans d'autres industries, récupération de la part d'aluminium [tm 206, TGI 1999].

Données opérationnelles : Non disponibles.

Effets croisés : Réduction de la quantité de déchets produite qui est nécessite une mise en décharge. Emission potentielle de phosphine dans l'air en l'absence de post-combustion. Les opérations de concassage sont potentiellement très génératrices de poussières et des observations montrent qu'elles peuvent avoir un impact importante sur l'environnement en raison des émissions fugitives.

Aspects économiques : Inconnus. Coût de l'équipement nécessaire à la mise en œuvre du procédé. Plusieurs installations fonctionnent de manière viable et les coûts de traitement sont similaires aux coûts de mise en décharge, en éliminant toutefois les « responsabilités futures ».

Applicabilité : - Tous les procédés utilisant un fondant salin.

Exploitations de référence : Allemagne, Espagne, France, Italie et Royaume-Uni.

Documents de référence : [tm 116, ALFED 1998] ; [tm 145, Winter 1998].

EXEMPLE 4.08 UTILISATION D'UN WAGONNET DE CHARGEMENT ÉTANCHE

Description : Un wagonnet ou une benne de chargement sont utilisés pour transférer les déchets dans un four réverbère. Le système est dimensionné de manière à ce que la benne adhère hermétiquement sur la porte ouverte du four pendant le déchargement des déchets et ainsi garantisse l'étanchéité du four pendant cette période.

Principaux bénéfices environnementaux : - Prévention des émissions fugitives lors du chargement des déchets.

Données opérationnelles : Non disponibles, mais des observations confirment l'efficacité du système.

Effets croisés : Effet positif car prévention des émissions fugitives de fumées et de vapeurs.

Aspects économiques : Données non disponibles. On estime que le coût est faible pour une benne de chargement de dimensions adaptées.

Applicabilité : Convient pour certains fours non tournants.

Exploitations de référence : Ce système est exploité en Belgique.

Documents de référence : [tm 121, Hoogovens 1998].

EXEMPLE 4.09 UTILISATION D'UN SYSTÈME DE COLLECTE CIBLÉ DES FUMÉES

Description : - Un système de collecte des fumées peut être conçu de manière à ce que la capacité du ventilateur d'exhaure puisse être dirigée vers des sources de fumées qui changent au cours d'un cycle de chargement, fusion et vidange. Le ciblage de la capacité de collecte des fumées peut être obtenu par l'utilisation de dispositifs de commande automatique de registre reliés aux commandes du four (ouverture de la porte, état du brûleur ou inclinaison du four, par exemple). Par conséquent, le déclenchement du registre peut être provoqué par les opérations de chargement, de fusion et de vidange et l'intensité de collecte des fumées peut être ciblée en conséquence.

Principaux bénéfices environnementaux : Prévention et minimisation des émissions fugitives dans l'air.

Données opérationnelles : Non disponibles, mais des observations indiquent que de tels systèmes sont très efficaces s'ils sont bien conçus et bien contrôlés.

Effets croisés : Effet positif. Prévention des émissions fugitives et optimisation de la consommation d'énergie du ventilateur.

Aspects économiques : Données non disponibles. Coût du système de contrôle et du dispositif de commande des registres relativement faible.

Applicabilité : La plupart des installations.

Exploitations de référence: Royaume-Uni, France

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

EXEMPLE 4.10 COLLECTE DES FUMÉES

Description : - Enceinte de collecte des fumées provenant de la zone de chargement et de soutirage d'un four tournant pour permettre l'utilisation d'un point d'extraction unique.

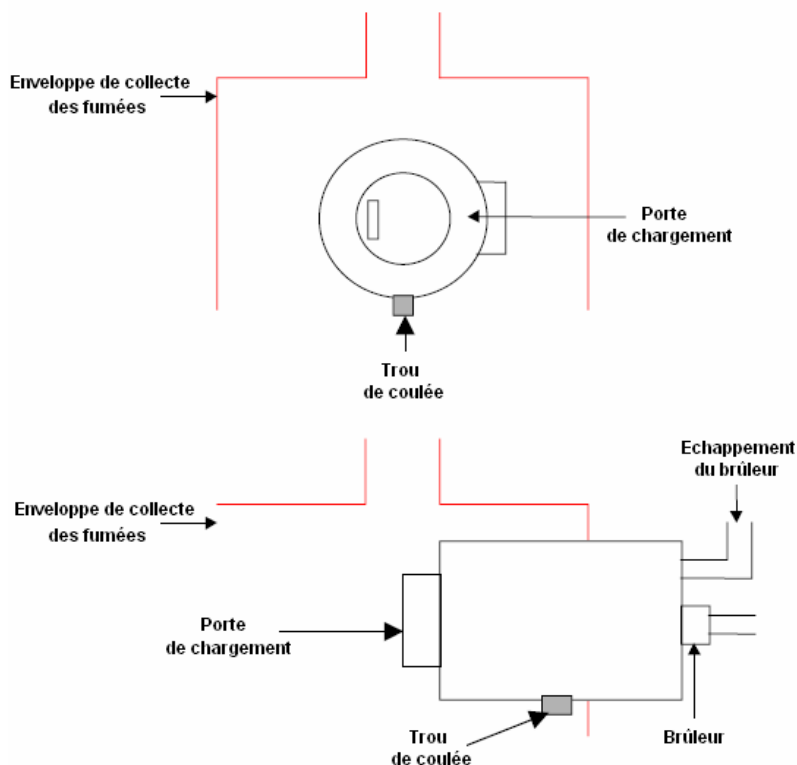


Figure 4.7 : Schéma d'un système de collecte intégral des fumées

Dans les applications destinées à la production d'autres métaux, des orifices de soutirage pratiqués sur la porte de chargement ont été utilisés et permettent d'obtenir une enceinte plus compacte. L'usure du garnissage du four peut signifier que les orifices de soutirage situés à l'extrémité de la porte ne permettent pas à la totalité du métal d'être vidangée.

Principaux bénéfices environnementaux : - Collecte des fumées à partir d'un point unique plus facile et plus efficace.

Données techniques : Non disponibles, mais des observations montrent un captage efficace des fumées.

Effets croisés : Effet positif. Collecte efficace et consommation d'énergie réduite.

Aspects économiques : Coût de la modification faible. Utilisé de manière viable dans plusieurs installations.

Applicabilité : Tous les fours tournants.

Exploitations de référence : France, Royaume-Uni.

Documents de référence : [tm 106, Farrell, 1998]

4.3.5 Procédés d'affinage

- Utilisation de chlore mélangé à de l'argon ou de l'azote comme réactifs dans les opérations de dégazage ou d'élimination du magnésium ou utilisation de fluorure d'aluminium, de KF ou de Na_3AlF_6 . Si nécessaire, collecte et traitement des gaz résultant du procédé afin d'éliminer les gaz acides.
- Utilisation de poches de traitement en ligne pour les injections de gaz dans le métal en fusion, le cas échéant.
- Utilisation de filtres en céramique en ligne pour éliminer les particules solides présentes dans le bain.

Les procédés et les techniques d'affinage conviennent aux installations nouvelles ainsi qu'aux installations existantes.

4.3.6 Procédés de coulée

Les procédés décrits en détail dans la section consacrée aux techniques utilisées sont des techniques à prendre en compte conjointement avec des dispositifs d'extraction des fumées efficaces au niveau des poches de coulée et des machines de coulée, le cas échéant. Le risque de formation de dioxines lors des procédés d'affinage utilisés pour la production d'aluminium de première et de deuxième fusion n'a pas fait l'objet de recherches approfondies. Il est recommandé que ce problème soit quantifié.

Ces procédés et ces techniques de collecte des fumées conviennent aux installations nouvelles ainsi qu'aux installations existantes.

4.3.7 Résidus d'écémage

Les procédés détaillés dans la section consacrée aux techniques utilisées sont des techniques à prendre en compte en association avec les dispositifs suivants afin de réduire au maximum l'impact sur l'environnement :

- Refroidissement des résidus d'écémage dans des conteneurs étanches sous atmosphère inerte.
- Prévention de l'exposition à l'humidité des résidus d'écémage.
- Traitement et récupération des résidus d'écémage, si possible.
- Limitation de la quantité de matériau mise en décharge.

Ces techniques de stockage et de traitement conviennent aux installations nouvelles ainsi qu'aux installations existantes.

4.3.8 Production d'anodes intégrée

L'utilisation des procédés décrits dans le Chapitre 12 constitue les techniques à prendre en compte. L'utilisation d'un épurateur à alumine et d'un système de filtre à manches intégrés au système de traitement des gaz de la cuve peut être envisagée pour les gaz provenant de la production d'anodes. Un filtre à coke peut être utilisé pour les phases d'homogénéisation et de mise en forme.

4.3.9 Collecte et dépollution des fumées/gaz

4.3.9.1 Aluminium primaire

Les techniques abordées précédemment dans ce chapitre destinées à assurer l'étanchéité des cuves et à préserver l'efficacité de la collecte sont des techniques à prendre en compte pour la collecte des fumées provenant des cuves impliquées dans la production d'aluminium primaire. L'utilisation d'un épurateur par voie sèche suivie par l'utilisation d'un filtre à manches pour éliminer les fluorures est une technique à prendre en compte. La collecte de l'air de ventilation provenant du hall d'électrolyse, si nécessaire, est également une technique à prendre en compte. L'utilisation de hottes secondaires est également une technique à prendre en compte pour le chargement des fours de coulée.

L'utilisation d'épurateur à eau de mer ou d'épurateurs basiques pour éliminer le dioxyde de soufre peut être prise en compte pour la réduction de la quantité totale de SO₂ émise. L'effet croisé sur l'eau doit être pris en compte localement.

4.3.9.2 Aluminium de deuxième fusion

Les techniques abordées dans les sections 2.7 et 2.8 de ce document destinées à assurer l'étanchéité des fours, capter les fumées, éliminer les poussières, les gaz acides et les dioxines sont des techniques à prendre en compte pour les différentes étapes du procédé impliquées dans la production d'aluminium de deuxième fusion. L'utilisation de hottes secondaires est également une technique à prendre en compte pour les étapes de transfert et de coulée.

Il existe plusieurs problèmes spécifiques à chaque site dont certains ont été abordés au début de ce chapitre. Globalement, l'utilisation conjointe des technologies de procédé abordées dans ce chapitre et d'un système de dépollution adapté permettra de satisfaire aux exigences les plus sévères en matière de protection de l'environnement

4.3.10 Régulation du procédé

Les principes de régulation du procédé abordés dans la section 2.6 s'appliquent aux procédés de production utilisés dans ce Groupe. Certains de ces procédés peuvent encore être améliorés grâce à l'adoption d'un certain nombre de ces techniques. La surveillance des conditions de fonctionnement des cuves et l'utilisation de données comparatives pour anticiper les perturbations du procédé tels que les effets d'anode et pour contrôler l'alimentation ponctuelle de l'alumine doivent être pris en compte pour tous les procédés.

4.3.11 Eaux usées

C'est un problème spécifique à chaque site. Les données collectées indiquent que les systèmes de traitement existants sont de très bonne facture. Toutes les eaux usées doivent être traitées afin d'en éliminer les solides et les huiles/goudrons. Les gaz acides absorbés (dioxyde de soufre, HCl, par exemple) devraient être neutralisés, si possible. Les techniques figurant dans la liste donnée en section 2.9 constituent les techniques à prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, les eaux de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

4.3.12 Résidus de procédé

Les principes de minimisation et de réutilisation des résidus de procédé sont des techniques à prendre en compte.

4.3.12.1 Aluminium primaire

Les résidus d'écémage peuvent être recyclés et les garnissages de cuve peuvent être réutilisés.

EXEMPLE 4.11 UTILISATIONS DES GARNISSAGES DE CUVE USAGÉS

Description : - Utilisation du carbone présent dans les garnissages de cuve usagés en procédés thermiques.

Principaux bénéfices environnementaux : - Utilisation du pouvoir calorifique du carbone, utilisation des AlF_3 résiduels comme fondants. Destruction de tous les CN présents.

Données opérationnelles : - Détails non disponibles, mais des garnissages de cuve usagés ont été utilisés avec succès pour la cuisson du ciment, comme carburant pour la production d'acier et comme substitut au coke pour la production de laine de roche

Effets croisés : - Effets positifs. Utilisation du pouvoir calorifique des garnissages de cuve usagés. Elimination des déchets déposés sur le sol. Le traitement thermique des garnissages de cuve usagés permet d'éviter l'intrant énergétique et les rejets qui y sont associés.

Aspects économiques : - Aucun revenu net, mais suppression des frais de traitement et de mise en décharge.

Applicabilité : - Tous les garnissages de cuve usagés dans la mesure où la réglementation relative au transfert des déchets le permet.

Exploitations de référence : France, Norvège.

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

4.3.12.2 Aluminium de deuxième fusion

Les garnissages de four et les poussières sous filtre peuvent être réutilisés dans certains procédés. L'utilisation de bicarbonate de sodium comme moyen d'épuration par voie sèche permet de générer des poussières sous filtre qui peuvent être envoyées vers un système de récupération du laitier salé. Les techniques de récupération du laitier salé permettent de récupérer le sel, l'aluminium et l'oxyde d'aluminium. Les résidus d'écémage peuvent être réutilisés dans les procédés appropriés. Des exemples ont déjà été donnés dans ce chapitre.

4.4 Meilleures techniques disponibles (MTD)

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêter une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production d'aluminium : les fluorures (y compris l'acide fluorhydrique), les poussières, le SO₂, COS, les HAP, les COV, les fumées, les gaz à effet de serre (PFC et CO₂), les dioxines (seconde fusion), les chlorures et le HCl ainsi que les résidus tels que les résidus de bauxite, les garnissages de fours usagés, les poussières sous filtre et le laitier salé ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux adaptés en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur conformément à l'Article 2(11) et à l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et a déterminé dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les nouvelles installations peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par des matières organiques.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisés dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; par exemple, certains procédés sont plus faciles à exploiter de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux de faible qualité et permettent donc de réduire l'impact environnemental global en empêchant la mise en décharge.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les matières premières disponibles sur le site et la capacité de traitement de l'installation – ces questions sont donc spécifiques à un site donné.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées par le procédé ?

- La nature de la charge et des autres matériaux qu'elle contient a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les niveaux d'émissions associés sont présentés plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

A l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et de techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de capacité de production réalisable et de matériaux pouvant être utilisés ; il existe donc différentes combinaisons possibles. Tous ces procédés maximisent la réutilisation des résidus tout en minimisant les émissions dans le milieu aquatique. Leurs caractéristiques économiques varient. Certains doivent fonctionner à une capacité élevée pour être rentables, tandis que d'autres ne permettent pas de fournir d'importantes capacités de production.

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » ; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un process ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local. Les exemples donnés dans la section sur les techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD indiquent les concentrations associées à certains procédés existants.

4.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions tirées pour les meilleures techniques disponibles applicables aux phases de manutention et de stockage des matériaux sont données dans la section 2.17 du présent document et sont applicables aux matériaux traités dans ce chapitre. Ces techniques sont les suivantes :

- Utilisation de systèmes de stockage de produits liquides entourés d'une enceinte de rétention étanche d'une capacité suffisante pour contenir au moins le volume de la plus grosse cuve de stockage présente dans l'enceinte. Diverses lignes directrices existent dans chaque Etat membre : elles devraient être appliquées comme prévu. Les zones de stockage doivent être conçues de telle sorte que les fuites provenant des parties supérieures des cuves et des systèmes de distribution soient

interceptées et confinées dans l'enceinte de rétention. Le contenu des cuves doit être affiché et les alarmes correspondantes doivent être utilisées. Utilisation de systèmes de contrôle automatique et de livraisons planifiées afin de prévenir le remplissage excessif des cuves de stockage.

- L'acide sulfurique et les autres matériaux réactifs doivent également être stockés dans des cuves à double enveloppe ou dans des cuves entourées d'enceintes de rétention résistantes aux produits chimiques et de capacité identique. L'utilisation de détecteurs de fuites et d'alarmes est une mesure raisonnable. S'il existe un risque de contamination des eaux souterraines, la zone de stockage doit être imperméable et résistante au matériau stocké.
- Les points de livraison doivent se situer dans l'enceinte de rétention afin de pouvoir collecter les écoulements accidentels de produit. Une ventilation secondaire des gaz en retour vers le véhicule de livraison doit être mise en place afin de réduire les émissions de COV. L'utilisation de dispositifs automatiques de restauration de l'étanchéité des raccordements au niveau de la livraison afin de prévenir tout écoulement accidentel doit être envisagée.
- Les matériaux incompatibles (matériaux organiques et matériaux oxydants, par exemple) doivent être séparés et des gaz inertes devront être utilisés dans les cuves ou les zones de stockage, si nécessaire.
- Utilisation de déshuileurs et de séparateurs de solides, si nécessaire, pour assurer le drainage de ces matériaux à partir des zones de stockage à ciel ouvert. Stockage des matériaux susceptibles de libérer de l'huile sur des surfaces bétonnées dotées de dispositifs de confinement. Utilisation de méthodes de traitement des effluents adaptées aux produits chimiques stockés.
- Les convoyeurs de transport et les conduites devront être placés dans des endroits dégagés et sûrs, en surface, de manière à ce que les fuites puissent être détectées rapidement et que les dommages causés par les véhicules et les autres équipements puissent être évités. En cas d'utilisation de conduites enterrées, leur tracé peut être documenté et faire l'objet d'une signalisation ; de plus, des systèmes d'excavation sûrs pourront être adoptés.
- Utilisation de récipients sous pression robustes et bien conçus pour les gaz (y compris le GPL) avec surveillance de la pression des cuves et des conduites de distribution afin de prévenir toute rupture ou fuite. Des appareils de surveillance des gaz en continu doivent être utilisés dans les zones confinées et proches des cuves de stockage.
- Si nécessaire, des systèmes de livraison, de stockage et de reprise étanches pourront être utilisés pour les matériaux pulvérulents et des silos pourront être utilisés pour le stockage journalier. Des bâtiments entièrement fermés peuvent être utilisés pour le stockage des matériaux pulvérulents. Ils n'auront peut-être pas besoin de dispositifs de filtration spéciaux.
- Des agents d'étanchéité (mélasse ou PVAL, par exemple) compatibles peuvent être utilisés, le cas échéant, afin de réduire la tendance du matériau à générer des poussières.
- Lorsque cela est nécessaire, des convoyeurs fermés munis de dispositifs d'extraction et de filtration robustes et bien conçus peuvent être utilisés sur les points de livraison, les silos, les systèmes de transfert pneumatique et les points de transfert du convoyeur afin de prévenir l'émission de poussières.
- Les matériaux non pulvérulents et non solubles peuvent être stockés sur des surfaces étanches munies d'un système de collecte et d'évacuation.
- Les copeaux, les tournures et autres matériaux contenant de l'huile soluble ou émulsionnée doivent être stockés à l'abri afin de les empêcher d'être lavés et lessivés par les eaux de pluie.

- Des systèmes de transport rationalisés peuvent être mis en place afin de réduire au maximum la création et le transport des poussières au sein d'un site. Les eaux de pluie qui lavent ces poussières doivent être collectées et traitées avant d'être rejetées.
- Utilisation de dispositifs de lavage des roues et de la carrosserie ou d'autres systèmes de nettoyage pour nettoyer les véhicules utilisés pour livrer ou manipuler des matériaux pulvérulents. Les conditions locales influenceront la méthode utilisée (formation de glace, par exemple). La planification de campagnes de balayage des routes peut être utilisée.
- Des systèmes de contrôle et d'inspection des stocks peuvent être mis en place afin de prévenir les écoulements accidentels et d'identifier les fuites.
- Des systèmes d'échantillonnage et d'essai des matériaux peuvent être intégrés au système de manutention et de stockage afin de déterminer la qualité des matières premières et de prévoir le type de procédé à utiliser. Ces systèmes doivent être conçus et utilisés selon les mêmes normes élevées que celles des systèmes de manutention et de stockage.
- Les zones de stockage des agents réducteurs (charbon, coke ou copeaux de bois) doivent faire l'objet d'une surveillance afin de détecter les incendies provoqués par une inflammation spontanée.
- Utilisation de bonnes pratiques de conception et de construction et entretien adéquat.

Le tableau récapitulatif relatif à la manutention et au stockage des matériaux est reproduit ci-après.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Combustibles, notamment liquides	Cuves ou fûts placés dans des zones dotées d'un dispositif de confinement.	Conduite sécurisée ou système manuel.	Lieu de stockage et pipeline chauffés.	Ventilation en retour des gaz déplacés.
Fondants et sels	Stockage dans un endroit fermé (silo) si formation de poussières.	Convoyeurs fermés dotés d'un système de collecte des poussières.		
Poussières fines (résidus d'écémage, etc.)	Stockage dans un endroit fermé si formation de poussières.	Manutention dans un endroit fermé doté d'un système de collecte des poussières.	Broyage et séparation par gravité.	
Copeaux	Aires couvertes si soluble ou huile émulsionnée.	Chargeur mécanique.	Séchage des copeaux, centrifugeage.	Collecte de l'huile, si nécessaire.
Poussières grossières	Aires ouvertes ou couvertes.	Chargeur mécanique.	Sécheur de copeaux, si nécessaire.	Collecte de l'huile, si nécessaire.
Morceaux (matière première ou laitier)	Stockage à l'air libre.	Chargeur mécanique.		Collecte de l'huile, si nécessaire.
Éléments entiers, feuilles et plaques	Aires ouvertes ou couvertes.	Chargeur mécanique.		Collecte de l'huile, si nécessaire.
Chlore sous forme de gaz ou mélanges contenant du chlore	Récipients sous pression agréés.	Méthodes agréées.		
Produits (brames, billettes, plaques et lingots)	Stockage à l'air libre.		Préchauffage.	.
Résidus de procédé à récupérer (résidus d'écémage, laitier salé et garnissages)	Stockage dans un endroit couvert ou fermé en fonction des poussières générées.	En fonction des conditions.	Séparation par broyage et/ou dissolution. Potentiellement très pulvérulent.	Les résidus d'écémage et le laitier salé doivent être conservés à l'abri de l'humidité. Système d'évacuation approprié.
Déchets à mettre en décharge	Aires couvertes ou fermées ou conteneurs couverts pour le transport en fonction du matériau.	En fonction des conditions.		Système d'évacuation approprié.

Tableau 4.26 : Récapitulatif des techniques de manutention et de stockage utilisées pour l'aluminium

4.4.2 Sélection du procédé

On ne peut définir une Meilleure Technique Disponible basée sur le procédé que pour la phase de fusion de l'aluminium primaire. Les autres techniques, y compris celles utilisées pour l'aluminium de deuxième fusion, considérées comme étant des MTD figurent dans la liste.

4.4.2.1 Fusion de l'aluminium primaire

Compte tenu de ces facteurs, l'utilisation de cuves à anodes précuites à piquage central munies de points d'alimentation en alumine multiples automatiques est considérée comme étant une MTD dans le cadre de la production d'aluminium primaire. Le procédé aura les caractéristiques suivantes :

- Contrôle informatique du procédé d'électrolyse basé sur les bases de données concernant les cuves actives et surveillance des paramètres de fonctionnement des cuves afin de limiter au maximum la consommation d'énergie et de réduire la fréquence et la durée des effets d'anode.
- Couverture complète des cuves par un système de hottes de captage ; ce système devra être relié à un dispositif d'évacuation des gaz et à un filtre. Utilisation de couvercles de cuve solides et taux d'extraction adéquats. Système étanche de refroidissement des mégots d'anode.
- Obtention d'un taux de captage des fumées provenant des cuves supérieur à 99 % à long terme. Réduction de la durée nécessaire à l'ouverture des couvercles et au remplacement des anodes. Utilisation d'un système programmé pour l'exploitation et l'entretien des cuves.
- Utilisation de méthodes de traitement efficaces et éprouvées dans les installations de fabrication de barres afin de récupérer les fluorures et le carbone. Utilisation de systèmes d'extraction et de filtration efficaces dans ces installations.
- Si les impacts locaux, régionaux ou transfrontaliers sur l'environnement nécessitent une réduction de la quantité de dioxyde de soufre, on utilisera dans la mesure du possible un carbone à faible teneur en soufre pour les anodes ou la pâte anodique, ou on utilisera un système d'épuration du dioxyde de soufre.
- Les gaz provenant du procédé de fusion primaire doivent être traités au moyen d'un épurateur à alumine et d'un filtre à manches afin d'en éliminer les poussières, les fluorures et le HF. L'efficacité d'épuration des fluorures totaux doit être supérieure à 99,8 % et l'alumine doit être utilisée dans les cuves d'électrolyse.
- En cas d'usine de fabrication d'anodes intégrée, les gaz de procédé doivent être traités dans un épurateur à alumine et dans un système de filtre à manches. L'alumine doit être utilisée dans les cuves électrolytiques. Les goudrons provenant des procédés d'homogénéisation et de formage peuvent être traités dans un filtre en coke.
- Mise en place d'un système de gestion de l'environnement, de contrôle de l'exploitation et d'entretien.

4.4.2.2 Fusion de l'aluminium de deuxième fusion

S'agissant de la production d'aluminium à partir de matières premières de deuxième fusion, les variations de charge doivent également être prises en compte au niveau local. Celles-ci auront une incidence sur la combinaison de fours et de systèmes de tri et de prétraitement des déchets ainsi que des systèmes de collecte et de dépollution associés qui seront utilisés. Les procédés de fusion considérés comme étant des MTD sont, selon les matériaux chargés, le four réverbère, le four tournant inclinable, le four tournant, le four à induction Meltower.

Four	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Four réverbère	Semi-étanche	Grande capacité de production de métal.	Rendement plus faible. Restrictions liées aux matériaux chargés.	Utilisation d'un système de chargement étanche (wagonnet de chargement).
Four réverbère avec puits latéral/puits de chargement	Semi-étanche	Le puits de chargement permet une récupération efficace des matériaux fins. Plus large gamme de matériaux chargés.	Rendement thermique plus faible.	Utilisation d'un système de chargement étanche (wagonnet de chargement).
Four tournant	Semi-étanche	Aucune restriction liée aux matériaux chargés. Bon rendement thermique.	Utilisation relativement importante de laitier salin.	Système d'extraction des fumées ciblé.
Four tournant inclinable	Semi-étanche	Efficace pour les charges de basse qualité, y compris les résidus d'écémage. Bon rendement thermique.	Capacité de production limitée.	Utilisation minimale de fondant salin comparé aux fours tournants fixes.
Four à induction	Ouvert, équipé de hottes.	Aucun gaz de combustion.	Capacité de production et variété des matériaux chargés limitées.	Utile pour les petites charges de métal propre.
Four à cuve	Semi-étanche	Préchauffage de la charge.		Destiné au métal propre.

Tableau 4.27 : Fours considérés comme MTD dans le cadre de la production d'aluminium de deuxième fusion

Le procédé aura les caractéristiques suivantes :

- Sélection de matériaux chargés adaptés au type de four et de système de dépollution et transfert des matières premières non adaptées vers d'autres exploitants utilisant un équipement conçu pour les utiliser de manière à pouvoir :
 - j. éviter l'utilisation de sel lorsque cela est possible, de manière à atteindre un rendement pratique optimal ;
 - k. limiter au maximum l'utilisation de sel dans les autres cas ;
 - l. récupérer le maximum de sous-produits possible (récupération de tout le laitier salé produit, par exemple).

Le but est de limiter au maximum le recours à la mise en décharge.

- Utilisation d'un wagonnet de chargement étanche ou d'un système d'alimentation étanche similaire, si possible.

- Utilisation d'enceintes ou de hottes pour les zones d'alimentation et de vidange et de systèmes d'extraction des fumées ciblés, si possible, afin de limiter au maximum la consommation d'énergie.
- Elimination de l'huile et des matières organiques au moyen d'une centrifugeuse de tournures, d'un sécheur de tournures ou de toute autre méthode d'élimination thermique des revêtements avant la phase de fusion (afin de réduire le risque d'émissions de dioxines et de matières organiques et de maximiser l'efficacité énergétique), à moins que le four ne soit spécialement conçu pour traiter les matières organiques.
- Utilisation de fours à induction à creuset pour les quantités relativement réduites de métal propre.
- Utilisation de dispositifs de post-combustion, si nécessaire, pour éliminer le carbone organique, y compris les dioxines.
- Injection de charbon actif et de chaux, si nécessaire, pour éliminer les gaz acides et le carbone organique, y compris les dioxines.
- Utilisation d'un dispositif de récupération de la chaleur, si possible.
- Utilisation de filtres à manches ou en céramique pour l'élimination des poussières.

4.4.2.3 Autres étapes du procédé

Les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD listées pour le prétraitement, l'affinage, la production d'alumine (4.3.2), les usines de fabrication d'anodes intégrées (Chapitre 12) sont considérées comme les meilleures techniques disponibles et sont résumées ci-dessous.

La technique spécifique utilisée dépend des matières premières et des autres installations disponibles sur ou à proximité du site de production. Elles font partie du procédé global conjointement avec les procédés suivants.

Étape du procédé	Technique	Commentaires
Production d'alumine	Procédé Bayer	Optimisé pour réduire la consommation d'énergie, pour éliminer les poussières et pour réutiliser l'eau de transport des boues rouges.
Affinage	Utilisation de mélanges de chlore et d'argon/azote ou de fondant salin (AlF_3).	Ajout via une poche en ligne pour l'injection de Cl_2 , Ar, N_2
Maintien de la température ou dégazage	Collecte des fumées provenant des fours et des chenaux de coulée, refroidissement, filtre à manches, si nécessaire.	Lingotières de coulée en fonction du produit.
Production d'anodes	Cf. Chapitre 12.	

Tableau 4.28 : Autres étapes du procédé considérées comme étant les meilleures techniques disponibles dans le cadre de la production d'aluminium primaire

Étape du procédé	Technique	Commentaires
Affinage	Utilisation de mélanges de chlore et d'argon/azote ou de fondant salin (AlF_3).	Gaz de couverture inerte ou compression des crasses.

Traitement des résidus d'écraimage	Gaz de couverture inertes et refroidissement dans un fût étanche ou dans une presse à crasses.	Formation d'ammoniac en présence d'humidité.
Maintien de la température ou dégazage	Collecte des fumées provenant des fours et des chenaux de coulée, refroidissement, filtre à manches, si nécessaire.	

Tableau 4.29 : Autres étapes du procédé considérées comme étant les meilleures techniques disponibles dans le cadre de la production d'aluminium de deuxième fusion

Il est recommandé de mener des recherches supplémentaires sur la formation potentielle de dioxines lors des phases d'affinage et de coulée du procédé de production d'aluminium de deuxième fusion.

4.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les systèmes de collecte des fumées utilisés pour la production d'aluminium primaire et de deuxième fusion doivent exploiter les systèmes d'étanchéité des cuves ou des fours et être conçus de manière à maintenir une dépression adaptée permettant d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Les systèmes favorisant le maintien de l'étanchéité des fours ou des cuves et le déploiement des hottes doivent être privilégiés. Exemples : ajout de matériau par les hottes, engins de chargement étanches et utilisation de registres/clapets tournants solides équipant les systèmes d'alimentation. La collecte des fumées secondaires est coûteuse et nécessite beaucoup d'énergie. Il est souvent plus pratique d'utiliser un système intelligent capable de cibler l'extraction de fumée sur la source et sur la durée de fumées spécifiques afin de limiter la consommation d'énergie au maximum.

Les meilleures techniques disponibles applicables aux systèmes de traitement des gaz et des fumées sont celles qui utilisent un refroidissement et une récupération de chaleur, si cela est possible, avant un passage dans un filtre à manches. Les filtres à manches ou en céramique utilisant des matériaux hautes performances modernes dans une structure bien conçue et bien entretenue conviennent. Ils comportent des systèmes de détection des éclatements de manche et des méthodes de décolmatage en ligne.

Les systèmes de récupération des gaz acides, l'injection de carbone/chaux pour l'élimination des dioxines et les phases associées de récupération des poussières et des métaux sont ceux décrites précédemment dans ce document. L'utilisation d'alumine comme moyen d'épuration pour l'élimination des fluorures et de l'acide fluorhydrique avec l'utilisation de l'alumine ayant réagi dans le procédé de production d'aluminium primaire est considéré comme étant une MTD. Les systèmes de collecte des fumées appliqueront la meilleure pratique soulignée dans les techniques décrites dans la section 2.7.

Étape du procédé	Collecte des fumées	Filtre à manches	Élimination des HAP	Élimination des COV
Matières premières	• (si pulvérulent)	• (si pulvérulent)		
Fusion primaire	•	• (avec épurateur à alumine par voie sèche)	•	
Usine de fabrication d'anodes intégrée	•	•	•	•
Production d'alumine	•	• (ou électrofiltre)		
Fours de maintien de la température et	•	•		

dégazage				
----------	--	--	--	--

Tableau 4.30 : Applications de dépollution considérées comme les meilleures techniques disponibles pour la production d'aluminium primaire

Étape du procédé	Collecte des fumées	Post-combustion	Filtre	Élimination des gaz acides	Élimination des COV
Matières premières	• (si pulvérulent)		• (si pulvérulent)		
Deuxième fusion	•	• (si nécessaire)	•	• (si nécessaire)	• (si nécessaire)
Séchage des copeaux et élimination des revêtements	• (si nécessaire)	• (si nécessaire)	• (si nécessaire)	• (si nécessaire)	• (si nécessaire)
Maintien de la température et dégazage	• (si nécessaire)		• (si nécessaire)		
Traitement du laitier salé et des résidus d'écémage	•	• (pour hydrogène, phosphine, etc.)	•		

Tableau 4.31 : Applications de dépollution considérées comme étant les meilleures techniques disponibles pour la production d'aluminium de deuxième fusion

L'utilisation ou le recyclage des résidus d'écémage et des poussières sous filtre, si ces options sont applicables, sont considérés comme faisant partie des procédés. La récupération d'énergie peut être appliquée à la plupart des étapes de production si la chaleur disponible est suffisante et si la chaleur récupérée a une utilité. Sous sa forme la plus simple, la récupération de chaleur au moyen de brûleurs régénératifs et d'un préchauffage de la charge peut être utilisée dans les unités de production d'aluminium de deuxième fusion.

D'autres systèmes de dépollution sont considérés comme étant applicables pour d'autres parties du procédé. Ils sont présentés dans le tableau suivant.

Étape du procédé	Composé présent dans les effluents gazeux	Options de dépollution
Manutention des matières premières	Poussières	Prévention et stockage correct. Collecte des poussières et filtre à manches.
Prétraitement des matières premières	Poussières Matières organiques*	Prétraitement correct. Collecte des gaz et filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion et refroidissement correct des gaz.
Fusion primaire (électrolytique)	Poussières, fluorures, PFC, (hydrocarbures et HAP**), dioxyde de soufre	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz. Épurateurs à alumine, puis traitement dans un filtre à manches. Traitement des gaz dans un épurateur par voie humide, si nécessaire.
Deuxième fusion	Poussières et métaux Gaz acides/halogénures Matières organiques*	Fonctionnement du procédé, collecte des gaz et élimination efficace des poussières. Épuration, si nécessaire. Fonctionnement du procédé, sélection et prétraitement des matériaux, post-combustion et refroidissement correct des gaz, injection de carbone, élimination efficace des poussières.
Maintien de la température et dégazage	Poussières, halogénures et métaux Matières organiques*	Fonctionnement du procédé et collecte/traitement des gaz. Fonctionnement du procédé, post-combustion et refroidissement correct des gaz.
Traitement du laitier salé et des résidus d'écémage	Poussières, ammoniac, phosphine et métaux	Fonctionnement du procédé et traitement/collecte des gaz.
Note. * Les matières organiques incluent les COV exprimés sous forme de carbone total (à l'exclusion du CO) et les dioxines. ** Si une usine de fabrication d'anodes est intégrée.		

Tableau 4.32 : Récapitulatif des agents polluants potentiels et des options de dépollution disponibles

4.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions captées/réduites provenant de diverses sources auxquelles s'ajoutent les émissions fugitives ou non captées provenant de ces mêmes sources. Les systèmes de dépollution modernes bien utilisés permettent d'éliminer efficacement les agents polluants. Les informations disponibles au moment de la rédaction du présent document indiquent que les émissions fugitives pourraient être à l'origine de la majeure partie des émissions dans l'air [tm 29, PARCOM 1997].

S'agissant de l'aluminium primaire, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :

- de la réception, du stockage, de l'homogénéisation et de l'échantillonnage des matériaux ;
- des fours de fusion, de maintien et d'affinage et des systèmes de transfert de métal et de manutention et de traitement des gaz chauds y afférents ;

- du système de manutention des résidus d'écémage.

S'agissant de l'aluminium de deuxième fusion, la quantité totale d'émissions dans l'air est basée sur les émissions provenant :

- de la réception, du stockage, de l'homogénéisation, de l'échantillonnage et du prétraitement des matériaux ;
- des fours de fusion, de maintien et d'affinage ainsi que des systèmes de transfert de métal et de manutention et de traitement des gaz chauds y afférents ;
- des systèmes de refroidissement et de manutention des résidus d'écémage et du laitier.

Les émissions fugitives pourraient être bien supérieures aux émissions collectées et réduites ; il convient d'évaluer ces émissions fugitives localement. Elles peuvent être évaluées à partir de l'efficacité à capter les fumées et en surveillant (cf. section 2.7) que le taux de captage des émissions provenant des cuves d'électrolyse des unités de production d'aluminium primaire est supérieur à 99 % à long terme. Les caractéristiques des gaz non traités provenant des cuves sont indiquées dans le tableau 5.4 ; ces caractéristiques peuvent permettre de déterminer l'impact potentiel des émissions fugitives.

Des systèmes de captage par hottes robustes et efficaces sont utilisés dans les procédés de production de plomb et de métaux précieux utilisant des fours tournants. Ces systèmes permettent de réduire considérablement les émissions fugitives dans l'atmosphère. Cette technique est applicable aux fours tournants utilisés pour la production d'aluminium. Des wagonnets ou des bennes de chargement étanches sont utilisés avec certains fours réverbères, permettant également de considérablement réduire les émissions fugitives dans l'air. Ces techniques sont présentées au début de ce chapitre sous forme d'exemples. Les tableaux suivants récapitulent les différentes techniques disponibles et les quantités d'émissions collectées et réduites qui leur sont associées.

Agent polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches.	Dépend des caractéristiques des poussières.
SO ₂	Non applicable	Contrôle de la teneur en soufre des anodes.	Destiné à réduire la quantité de SO ₂ .
Polyfluorhydrocarbures	< 0,1 effet d'anode par cuve et par jour	Régulation de procédé basé sur les bases de données des cuves actives.	< 0,1 kg/t Al
HF Fluorures totaux	< 0,2 mg/Nm ³ < 0,5 mg/Nm ³	Épurateur à alumine et filtre à manches.	Pour les procédés à production d'anodes intégrée, cf. Chapitre 12.
Note. Emissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données sous forme de moyennes journalières basées sur une surveillance en continu pendant la période de fonctionnement du procédé. S'il n'est pas possible de mettre en place une surveillance en continu, la valeur sera la moyenne sur la période d'échantillonnage. S'agissant du système de dépollution utilisé, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et la température de fonctionnement correcte sera utilisée.			

Tableau 4.33 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation d'une MTD pour l'électrolyse de l'aluminium primaire

Agent polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches.	
Chlorures, fluorures et gaz acides	SO ₂ < 50 – 200 mg/Nm ³ Chlorures < 5 mg/Nm ³ Fluorures < 1 mg/Nm ³	Epurateur alcalin par voie humide ou semi-sèche.	
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 – 300 mg/Nm ³	Brûleur bas Nox Brûleur d'oxycombustion	Des valeurs plus élevées sont associées à l'enrichissement en oxygène afin de réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, les volumes de gaz et les émissions massiques sont réduits.
Note. Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données sous forme de moyennes journalières basées sur une surveillance en continu pendant la période de fonctionnement du procédé. S'il n'est pas possible de mettre en place une surveillance en continu, la valeur sera la moyenne sur la période d'échantillonnage. S'agissant du système de dépollution utilisé, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.			

Tableau 4.34 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation d'une MTD pour le maintien en température et le dégazage du métal en fusion pour l'aluminium primaire et de deuxième fusion

Agent polluant	Plage de valeurs associée à l'utilisation d'une MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches.	Des filtres à manches hautes performances permettent d'atteindre de faibles niveaux de métaux lourds. La concentration en métaux lourds est liée à la concentration en poussières et à la teneur en métaux des poussières.
Chlorures, fluorures et gaz acides	SO ₂ < 50 – 200 mg/Nm ³ Chlorures < 5 mg/Nm ³ Fluorures < 1 mg/Nm ³	Épurateur alcalin par voie humide ou semi-sèche.	
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 – 300 mg/Nm ³	Brûleur bas NO _x Brûleur d'oxycombustion	Des valeurs plus élevées sont associées à l'enrichissement en oxygène afin de réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, les volumes de gaz et les émissions massiques sont réduits.
Carbone organique total exprimé en C	< 5 – 15 mg/Nm ³ < 5 – 50 mg/Nm ³	Post-combustion, combustion optimisée	Pré-traitement des matières premières secondaires pour éliminer les revêtements organiques
Dioxines	< 0,1 – 0,5 ng TEQ/Nm ³	Système d'élimination des poussières à haut efficacité (filtre à manches, par exemple), post-combustion suivie d'un refroidissement rapide. D'autres techniques sont disponibles (adsorption sur charbon actif, catalyseur d'oxydation).	
Note. Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données sous forme de moyennes journalières basées sur une surveillance en continu pendant la période de mise en œuvre du procédé. S'il n'est pas possible de mettre en place une surveillance en continu, la valeur sera la moyenne sur la période d'échantillonnage. S'agissant du système de dépollution utilisé, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée. S'agissant de l'élimination du SO ₂ ou du carbone total, la variation en concentration de gaz brut lors des procédés en discontinu peut affecter les performances du système de dépollution.			

Tableau 4.35 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation d'une MTD pour le prétraitement (y compris un séchage des tournures), la fusion, dans le cas de l'aluminium de deuxième fusion

4.4.4 Eaux usées

C'est un problème spécifique à chaque site. Les systèmes de traitement existants sont reportés comme étant de bonne facture. La totalité des eaux usées sera traitée de manière à éliminer les solides et les huiles/goudrons. Les gaz acides absorbés (dioxyde de soufre, HF, HCl, par exemple) devront être neutralisés, si nécessaire. Les techniques figurant dans la liste donnée en section 2.9 sont les techniques à

prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

S'agissant de la production d'aluminium primaire et de deuxième fusion, la quantité totale d'émissions dans l'eau est basée sur :

- La production d'alumine
- Le système de stockage des matériaux
- Le système de refroidissement du transformateur des cuves électrolytiques.
- Le système d'épuration, le cas échéant.
- Le système de traitement des eaux usées et les eaux de ruissellement.

L'utilisation d'eau est minime car les procédés sont essentiellement secs en dehors des systèmes d'épuration par voie humide. Le tableau suivant récapitule les concentrations obtenues à l'aide de méthodes de traitement des effluents adaptées. Lorsque cela est possible, les boues peuvent être réintroduites dans le procédé.

Composé	Concentration mg/l	Commentaires
Solides en suspension	14	Comprend une usine de fabrication d'anodes.
DCO	37	Comprend une usine de fabrication d'anodes.
Fluorures	17	Comprend une usine de fabrication d'anodes.
Hydrocarbures totaux	0,8	Comprend une usine de fabrication d'anodes.
Note – Les émissions associées proviennent de l'usine d'Aluminium Dunkerque et sont données sous forme de moyennes journalières pendant le fonctionnement du procédé.		

Tableau 4.36 : Emissions dans l'eau associées à l'utilisation d'une MTD pour la production d'aluminium primaire dotée d'une usine de fabrication d'anodes intégrée

4.4.5 Résidus de procédé

Les principes de la minimisation et de la réutilisation des résidus de procédé sont des techniques qui font partie des MTD.

Les procédés de production utilisés dans ce secteur ont été développés par l'industrie afin d'optimiser la réutilisation de la majorité des résidus de procédé provenant des unités de production ou afin de produire des résidus sous une forme qui leur permette d'être réutilisés dans d'autres procédés de production. Les sections 4.2.1.4 et 4.2.2.3 donnent un aperçu des différentes utilisations finales potentielles pour les résidus. Ces sections indiquent également certaines quantités-types correspondant à des installations spécifiques.

Voici quelques exemples spécifiques :

- Utilisation des garnissages de cuve usagés dans d'autres procédés comme matière première ou comme combustible, si possible.
- Limitation de l'utilisation de fondants salins lorsque cela est possible.
- Recyclage du laitier salin afin de récupérer l'aluminium, le sel et les oxydes qu'il contient.
- Réutilisation des garnissages de four lorsque cela est possible.

- Réutilisation des poussières sous filtre provenant de la production d'aluminium primaire dans le procédé.
- Réutilisation des poussières sous filtre provenant des fours utilisés pour la production d'aluminium de deuxième fusion dans le procédé (si possible). Traitement de ces poussières sous filtre, le cas échéant, afin de détruire les dioxines avant mise en décharge.

La quantité de résidus produite dépend fortement des matières premières utilisées, et notamment de la teneur en sodium des matériaux de première fusion, de la teneur en autres métaux non-ferreux (Mg, par exemple) des matériaux de deuxième fusion et de la présence d'autres agents contaminants (matières organiques, par exemple). Par conséquent, les émissions dans les sols peuvent être très spécifiques à un site et un matériau donné et dépendent des facteurs mentionnés ci-dessus. Il est donc impossible d'élaborer un tableau-type réaliste des quantités associées à l'utilisation d'une MTD sans détailler les spécifications des matières premières. Les principes d'une MTD incluent la prévention et la minimisation des déchets et la réutilisation des résidus à chaque fois que cela est possible. L'industrie s'est montrée très efficace dans ces domaines.

Source	Options d'utilisation et de traitement
Résidus d'écémage d'aluminium	Récupération
Poussières sous filtre	Réutilisation dans le procédé.
Garnissages de four usagés	Carburant, fondant et garnissages de four.
Briques	Provient de l'usine d'anodes. Réutilisation.
Acier	Récupération
Poussières de carbone (usine d'anodes)	Réutilisation

Tableau 4.37 : Options disponibles pour les résidus provenant de la production d'aluminium primaire

Résidu	Origine	Traitement	Commentaires sur le traitement
Laitier salin	Fusion dans un four tournant à tambour	Récupération par broyage, dissolution ou cristallisation. Production de substances réutilisables, si possible (granulés d'Al, sels mélangés, Al_2O_3 (et autres oxydes)).	Le procédé devrait atteindre de hautes performances environnementales. Emissions fugitives de poussières et de gaz tels que la phosphine, l'hydrogène devrait être collecté et traité. Destiné à éviter la mise en décharge.
Poussières sous filtre	Traitement des effluents gazeux	Mise en décharge avec prétraitement ou enfouissement souterrain. Partiellement reconditionné avec le laitier salin ou utilisé dans l'industrie sidérurgique.	La mise en décharge de surface est interdite dans certains pays. Traitement thermique possible (neutralisation avec $NaHCO_3$ ou Na_2CO_3 → utilisation avec le laitier salin).
Garnissages de four	Four de fusion	Possibilité de reconditionnement avec les résidus d'écémage, sinon lixiviation + mise en décharge.	Pas de mise en décharge de surface dans certains pays. Production de composés de moulage par injection reportée.
Résidus d'écémage	Tous les fours n'utilisant pas de sel, nettoyage des fours de fusion.	Fusion dans un four tournant. Récupération, pelletes utilisées dans un four tournant à tambour, poussières de scories utilisées dans la récupération du laitier salin.	Destiné à éviter la mise en décharge
Note. * Utilisation d'un four à cuve fermée. ** Produits non métalliques (oxydes provenant des déchets d'Al)			

Tableau 4.38 : Options disponibles pour les résidus provenant de la production d'aluminium de deuxième fusion

4.4.6 Coûts associés à ces techniques

Des données relatives aux coûts ont été compilées pour un ensemble de variantes de procédés et de systèmes de dépollution. Certains coûts sont inclus, lorsque cela est possible, dans les exemples donnés précédemment dans ce chapitre. Les données relatives aux coûts sont spécifiques à chaque site et

dépendent d'un certain nombre de facteurs ; toutefois, les fourchettes données peuvent permettre d'effectuer certaines comparaisons. D'autres données relatives aux coûts sont données dans une annexe jointe à cette note de manière à ce que les coûts afférents aux procédés et aux systèmes de dépollution de l'ensemble de l'industrie des métaux non-ferreux puissent être comparés.

4.5 Technologies émergentes

- La réutilisation des poussières sous filtre provenant de la production d'aluminium de deuxième fusion a été démontrée en Espagne et en Autriche. Les poussières et les fumées provenant d'un four tournant sont traitées à l'aide d'un moyen d'épuration constitué de bicarbonate de soude et de charbon actif afin d'en éliminer les chlorures produits par le flux salin. Du chlorure de sodium se forme lors de cette opération. Les poussières sont alors collectées dans un filtre à manches, puis intégrées au sel chargé dans le four [tm 145, Winter 1998].
- Il existe plusieurs procédés pour extraire le fer des boues rouges, mais ceux-ci n'ont pas été exploités commercialement [tm 212, Noyes 1993]. Des recherches ont également été menées sur l'utilisation des boues rouges dans la fabrication de matériaux de construction, de briques et de béton.
- Anodes inertes. Développement de nouvelles anodes sans carbone, ce qui permettrait de construire une cuve électrolytique entièrement nouvelle sans aucun élément directement consommable et de remplacer le dioxyde de carbone produit au niveau de l'anode par de l'oxygène. Ainsi, ce procédé n'émettrait plus de HAP. La technologie permettant d'arriver à ce résultat en est au stade pilote et nous ne disposons pas encore d'une documentation satisfaisante sur les essais effectués.
- Cathodes mouillables. Développement de nouveaux matériaux ou revêtements cathodiques pour les cathodes existantes afin que le processus électrolytique atteigne un meilleur rendement énergétique. Ce projet est en phase de développement et a été testé dans des cuves expérimentales.
- Séparation des alliages. Des techniques permettant la séparation des déchets d'aluminium en différents types d'alliages ont été testées au moyen d'une technologie de laser et de courant de Foucault. Ces techniques facilitent la sélection des matériaux à recycler et la production des alliages désirés dans les installations de recyclage.
- Injection rotative de gaz ou de fondant pour l'affinage. Cette technique permet de mieux contrôler les ajouts de fondants dans les fours de maintien. Cette technique est déjà utilisée dans certaines installations.
- Utilisation de filtres à manches catalytiques pour contrôler les émissions de dioxines. Le catalyseur ne se contentera pas de collecter les dioxines : il les détruira.
- Utilisation d'un four électrique à arc pour la fusion sans sel des dross.
- Traitement du laitier salin par voie sèche.
- Récupération du sel par électrodialyse plutôt que par concentration.
- Surveillance en continu des émissions canalisées d'acide fluorhydrique afin de détecter les éventuelles pannes du système de dépollution (épurateur à alumine/filtre à manches).

5 PROCÉDES DE PRODUCTION DU PLOMB, DU ZINC ET DU CADMIUM (+ Sb, Bi, In, Ge, Ga, As, Se, Te)

5.1 Procédés et techniques appliqués

Souvent associés dans les minerais et les concentrés, ces métaux peuvent être extraits et séparés au moyen d'un certain nombre de techniques. Le choix de la méthode à employer (procédé pyrométallurgique, hydrométallurgique ou combiné) dépend généralement de l'état chimique (présence de soufre ou d'oxyde) et de la proportion relative des métaux. Certaines de ces techniques sont également appliquées aux matières premières secondaires ou mixtes (primaires et secondaires) [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. Dans certains cas, les matières premières secondaires sont séparées et les parties telles que la pâte à batterie sont envoyées vers d'autres unités de traitement mieux adaptées à ces matériaux.

5.1.1 Plomb primaire

Il existe deux procédés pyrométallurgiques de base permettant de produire du plomb à partir de concentrés de galène ou de concentrés mixtes galène-sulfure de zinc : les procédés de frittage/fusion ou de fusion directe. Ces techniques peuvent également être utilisées dans le cas de mélanges de concentrés et de matières premières secondaires.

5.1.1.1 Frittage/fusion dans un haut fourneau ou un four Imperial Smelting

Les concentrés de plomb sont mélangés avec des fines de frittage recyclées, des matières secondaires et d'autres matériaux issus du procédé, puis agglomérés dans des tambours rotatifs. Les granulés sont alimentés dans un four à flamme directe ou inversée où ils sont calcinés. Les granulés brûlants passent dans une série de boîtes à vent dans lesquelles de l'air est soufflé. Le soufre est oxydé et transformé en dioxyde de soufre, et la réaction génère suffisamment de chaleur pour fondre et agglomérer les granulés [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

Le produit de frittage est concassé et criblé à la taille requise pour le four. Les matériaux déclassés inférieurs sont refroidis en étant mélangés aux boues déshydratées recueillies dans le dispositif d'épuration du gaz puis redirigés vers la zone de mélange.

On récupère le dioxyde de soufre des effluents gazeux du four de frittage qui sont refroidis, épurés et récupérés sous la forme d'acide sulfurique. Ces effluents gazeux ou l'acide sulfurique produit contient également du cadmium et du mercure, qui sont récupérés.

Le produit fritté est chargé dans le haut fourneau avec du coke métallurgique. De l'air parfois enrichi en oxygène est injecté par les tuyères du four et réagit avec le coke, ce qui entraîne la formation de monoxyde de carbone. Cette réaction génère suffisamment de chaleur pour fondre la charge. Le contenu en gangue de la charge du four s'associe aux fondants ou aux réactifs qui ont été ajoutés pour former un laitier.

Le monoxyde de carbone réduit les oxydes métalliques contenus dans la charge. Le laitier et le plomb s'accumulent au fond du four et sont vidangés de façon périodique ou continue. Le laitier est trempé et granulé avec de l'eau, ou laissé à refroidir avant d'être concassé, en fonction de son usage final ou des autres utilisations envisagées.

Pour fondre la masse de concentrés de plomb et de zinc et de matières premières secondaires, on utilise un haut fourneau spécialement conçu à cet effet : le four Imperial Smelting, dans lequel sont chargés le produit fritté chaud, du coke préchauffé ainsi que des briquettes chaudes. Outre ces matières premières, on

injecte de l'air chaud, parfois enrichi en oxygène. La réduction des oxydes métalliques produit non seulement du plomb et du laitier, mais aussi du zinc, volatil à la température de fonctionnement du four, qui s'échappe de l'Imperial Smelting avec les effluents gazeux générés par la fusion. Ces gaz contiennent également du cadmium et du plomb.

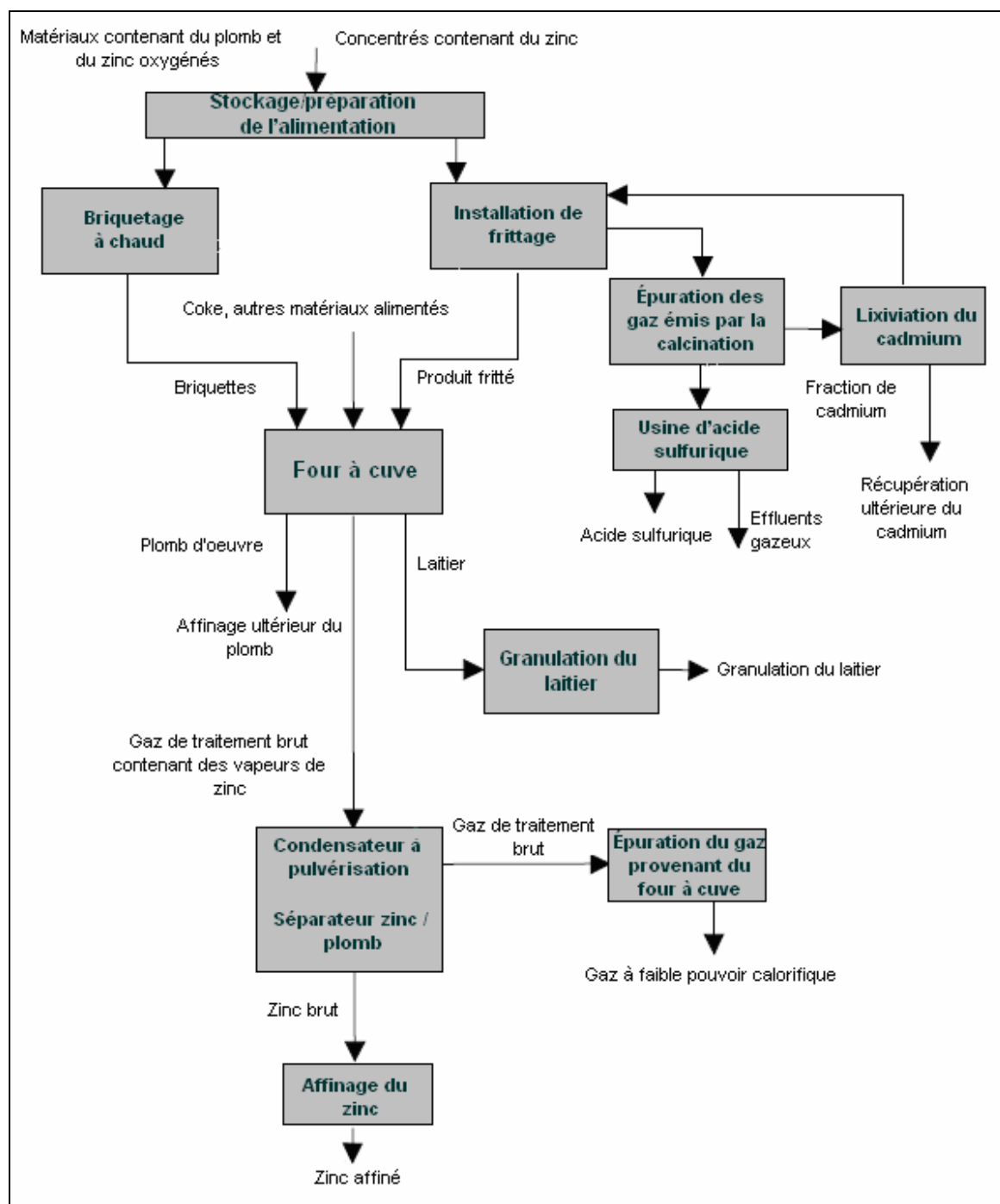


Figure 5.1 : Schéma représentant un procédé Imperial Smelting classique, utilisé dans la production de zinc et de plomb [tm 102, DFIU Zn 1999] [FIGURE : ajouter « four IS » dans la case « four à cuve »]

Les gaz provenant du four passent dans un condenseur à pulvérisation dans lequel ils sont refroidis par des gouttelettes de plomb fondu : les métaux sont ainsi absorbés dans le plomb liquide. L'alliage qui en résulte est refroidi lorsque le zinc flotte à la surface avant d'être séparé du plomb. Le zinc est affiné par distillation – un procédé présenté plus loin dans le chapitre. Le plomb est réalimenté dans le condenseur à pulvérisation [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

Une fois cette étape achevée, les gaz de combustion à faible pouvoir calorifique, qui contiennent du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, sont épurés puis brûlés pour préchauffer l'air et le coke.

5.1.1.2 Fusion directe

Plusieurs procédés sont utilisés pour la fusion directe des concentrés de plomb et de certaines matières premières secondaires servant à produire du plomb brut et du laitier : on applique les procédés à bain fondu – les fours ISA Smelt/Ausmelt (parfois associés à des hauts-fourneaux) ; les procédés intégrés Kaldo (TBRC) et QSL sont utilisés en Europe et dans le reste du monde. Le procédé intégré Kivcet est également employé : il s'agit d'un procédé de fusion flash. Les fours sont décrits dans la section 2.6 de ce document. Dans les fours ISA Smelt/Ausmelt et le procédé QSL, les charges agglomérées sont humides, tandis que les méthodes Kaldo et Kivcet utilisent des charges sèches.

Dans ce cas, l'étape de frittage n'est pas effectuée séparément : les concentrés de galène et les matières premières secondaires sont directement chargés dans un four et sont alors fondus et oxydés. Le dioxyde de soufre ainsi formé est recueilli, épuré et converti en acide sulfurique. On ajoute à la charge en fusion du carbone (coke ou gaz) et des fondants ; l'oxyde de plomb se transforme en plomb par réduction, et on obtient un laitier. Du zinc et du cadmium sont « vaporisés » dans le four, et leurs oxydes sont captés et dirigés dans l'unité de dépollution où ils sont récupérés [tm 120 TU Aachen 1999].

Tous ces procédés produisent un laitier riche en plomb, mais les fours QSL et Kivcet comportent une zone de réduction intégrale permettant de réduire la teneur en plomb du laitier à un niveau acceptable; le procédé Kaldo utilise un procédé annexe de vaporisation du laitier. A l'heure de la rédaction du présent document, le laitier à base de silice obtenu à l'issue du procédé QSL est accepté comme matériau de construction. Ces procédés assurent également la récupération de la chaleur et la transformation du dioxyde de soufre en acide sulfurique. Les poussières recueillies dans l'unité de dépollution sont de nouveau utilisées dans le process ; ces poussières recyclées peuvent être lavées ou lixiviées pour réduire leur teneur en halogénures et en Zn/Cd [tm 120 TU Aachen 1999].

La mise en œuvre adéquate de tous ces procédés a nécessité un certain temps, et leurs résultats sont conformes aux prévisions en termes de capacité de production et de taux de conversion. Le procédé Kaldo, qui s'effectue en deux étapes [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 35, LRATP 1995 ; tm 102, DFIU Zn 1999], est bien en place. Il est indiqué que le procédé QSL ait surmonté l'ensemble des difficultés initiales et fonctionne efficacement à l'heure actuelle. A l'heure de la rédaction du présent document, les fours ISA Smelt/Ausmelt ne sont utilisés que pour l'étape initiale de fusion et n'ont pas encore été mis en service pour l'étape de réduction du laitier. Le four Kivcet fonctionne avec succès depuis 1990 [tm 120 TU Aachen 1999].

Procédé	Teneur en plomb du laitier [%]	Commentaires
QSL	< 3	Fonctionne efficacement Procédé viable
Kivcet	3 - 5	Fonctionne avec succès
ISA Smelt/Ausmelt	Non disponible	Mis en œuvre uniquement pour l'étape de fusion
Four Kaldo	2 - 4	Fonctionne efficacement - mélange Pb/Cu

Tableau 5.1 : Procédés de fusion directe

5.1.2 Plomb secondaire

5.1.2.1 Récupération du plomb contenu dans les batteries usagées

Les batteries de véhicules usagées (automobiles, énergie motrice et batteries de réserve) constituent une source majeure de plomb secondaire. Le tableau suivant présente la composition classique des accumulateurs au plomb-acide usagés [tm 102, DFIU Zn 1999] :

Constituant	[pourcentage en poids]
Constituants en plomb ou en alliage de plomb (grille, pôles...)	25 - 30
Pâte d'électrodes (fines particules d'oxyde de plomb et de sulfate de plomb)	35 - 45
Acide sulfurique (H_2SO_4 : 10 – 20 %)	10 - 15
Polypropylène	4 - 8
Autres plastiques (PVC, PE, etc.)	2 - 7
Ébonite	1 - 3
Autres matériaux (verre...)	< 0,5

Table 5.2 : Composition classique des accumulateurs au plomb-acide usagés

Il existe deux principaux types de procédés permettant de récupérer le plomb contenu dans les batteries automobiles [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 35, LRTAP 1995 ; tm 102, DFIU Zn 1999] :

- g) les batteries sont vidées de leur acide et chargées entières dans un haut fourneau ou dans un four à cuve (procédé Varta) ou

Les batteries entières et les fondants sont alimentés dans un haut fourneau via un dispositif étanche, et on utilise de l'air enrichi en oxygène dans le haut fourneau. On obtient du plomb d'œuvre antimonie ainsi qu'un laitier à base de silice et une matte de plomb/fer que l'on peut récupérer dans un four de fusion du plomb primaire [tm 120 TU Aachen 1999].

Les composés organiques contenus dans les effluents gazeux de combustion sont oxydés dans un dispositif de post-combustion, puis les gaz sont refroidis et filtrés dans un filtre à manches. Les poussières sous filtre sont déchlorées puis redirigées vers le four.

- h) les batteries sont vidées de l'acide qu'elles contiennent, broyées et séparées en différentes fractions au moyen d'équipements automatiques brevetés (procédés MA et CX).

Les procédés MA et CX (Engitec) utilisent des broyeurs à marteaux pour concasser les batteries entières. Le matériau concassé passe ensuite dans une série de cribles, de classificateurs par voie humide et de filtres, ce qui permet d'obtenir différentes fractions contenant des constituants métalliques, de la pâte à base d'oxyde de plomb et de sulfate de plomb, du polypropylène, des plastiques et du caoutchouc non-recyclables ainsi que de l'acide sulfurique dilué [tm 106, Farrell 1998]. Certains procédés comprennent une seconde étape de broyage réalisée avant que la fraction constituée par les plastiques ne subisse un traitement final. Dans la mesure du possible, le polypropylène est recyclé. L'acide sulfurique obtenu à partir des batteries est neutralisé (à moins qu'il ne soit utilisé localement) et le sulfate de sodium produit peut être recristallisé et vendu. Ces choix dépendent fortement du marché.

Le traitement du soufre contenu dans les matériaux constitutifs des batteries peut s'effectuer de plusieurs façons :

- la pâte de sulfate de plomb peut être désulfurée avant la fusion par réaction avec du carbonate de sodium ou de l'hydroxyde de sodium (procédé CX ou procédés similaires) ;
- le sulfate de plomb peut être séparé puis envoyé vers une installation conçue pour réduire la teneur en soufre des gaz (par l'un des procédés de fusion directe du plomb primaire, par ex.) ;
- le soufre peut être fixé dans le laitier ou sous la forme d'une matte de Fe/Pb.

La désulfuration de la pâte avant la fusion permet de réduire la quantité de laitier produite et, selon le procédé de fusion utilisé, la quantité de dioxyde de soufre rejetée dans l'air.

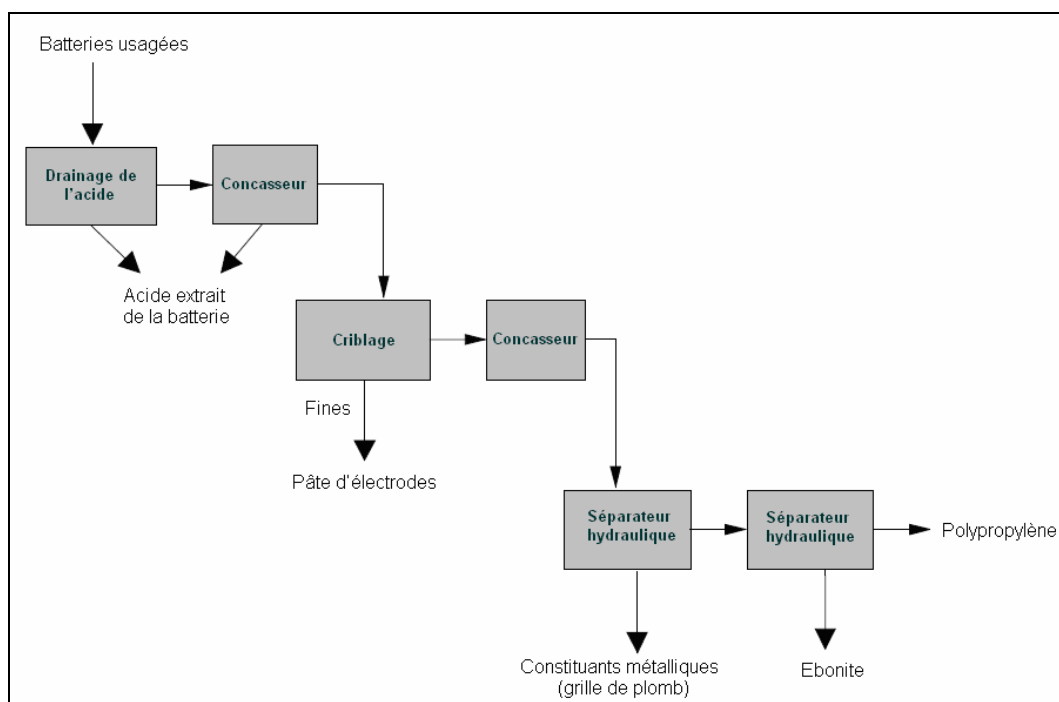


Figure 5.2 : Schéma représentant un procédé classique de récupération des constituants des batteries [tm 102, DFIU Zn 1999]

La fusion peut être réalisée dans différents types de fours [tm 102, DFIU Zn 1999] :

- four tournant,
- four à réverbère et haut fourneau ou four électrique,
- four rotatif,
- four ISA Smelt,
- four électrique.

Les fours rotatifs ou à réverbère sont chauffés soit au gaz, soit par combustible liquide. Dans de nombreuses installations, l'air est enrichi en oxygène. La fusion s'effectue généralement de façon discontinue. Le laitier et le métal sont vidangés séparément, et les lots de laitier sont traités pour récupérer davantage de plomb et améliorer la stabilité du laitier. Le volume de soufre contenu dans la charge est fixé dans le laitier, qui est un composé de sodium-fer-soufre avec de petites quantités de plomb et d'autres métaux.

Dans le procédé ISA Smelt, la pâte désulfurée et le réducteur sont alimentés en continu dans le four et le plomb d'œuvre est vidangé à intervalles réguliers. Lorsque réacteur contient un volume maximal de

laitier, on ajoute un réducteur et des fondants pour obtenir un plomb d'œuvre riche en antimoine et un laitier à évacuer [tm 41, Ausmelt 1997 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. Le laitier peut également être réduit dans un autre four.

On utilise un four électrique à résistances pour les matières premières secondaires complexes : ce type de four utilise un bain de laitier ouvert recouvert par du coke. Les matières premières sont chargées à la surface du bain où elles réagissent et produisent du métal et du laitier qui seront ensuite vidangés à intervalles réguliers. Les effluents gazeux, qui contiennent du monoxyde de carbone, sont brûlés ; les poussières émises dans les fumées sont recueillies, ce qui permet de récupérer du zinc. Le four électrique à résistances fonctionne par campagnes, alternées avec la production de cuivre secondaire dans un four de fusion du cuivre.

Le métal d'œuvre brut produit par l'une ou l'autre de ces méthodes est affiné au moyen des procédés décrits ci-dessous.

5.1.2.2 Récupération du plomb à partir d'autres déchets métalliques et résidus

Les déchets métalliques contenant du plomb peuvent prendre les formes les plus diverses ; le plomb peut y être contaminé par des matières plastiques ou du bitume et former un alliage avec d'autres éléments, notamment l'étain, l'antimoine et l'argent. Ce matériau est généralement récupéré au moyen des procédés décrits ci-dessus, étant donné que les fonderies simples ne sont pas en mesure de traiter les substances partiellement brûlées présentes dans les effluents gazeux. Les fours électriques servent également à récupérer le plomb contenu dans les matières premières secondaires complexes de type plomb/cuivre ou plomb/métaux précieux. Les gaz sont soumis à une post-combustion destinée à détruire le monoxyde de carbone et les hydrocarbures, y compris les dioxines.

Les déchets propres sont fondus dans des cuves spécialement conçues à cet effet, chauffées indirectement au fioul ou au gaz. Les déchets sont chargés via une trémie d'alimentation située au-dessus de la cuve. Les scories et les impuretés sont écrémées de la surface du métal en fusion puis passées à travers un crible qui sépare les fractions fines des fractions grossières. Les scories, qui constituent la fraction fine, sont recyclées comme résidus non-métalliques. Les impuretés sont constituées principalement des métaux présentant un point de fusion plus élevé que le plomb ; elles sont traitées dans d'autres installations.

Les résidus, largement non-métalliques de nature, mais souvent mélangés à d'autres déchets métalliques contenant du plomb, sont fondus dans des fours rotatifs avec des fondants. Les résidus contenant du plomb résultant de la production de plomb tétra-alkylé sont fondus dans des fours à réverbères chauffés au gaz.

Le plomb ou les alliages de plomb récupéré(s) à partir des déchets métalliques ou des résidus est/sont affiné(s), au besoin, à l'aide des techniques décrites ci-dessous.

5.1.3 Affinage du plomb primaire et secondaire

Le plomb d'œuvre peut contenir des quantités variables de cuivre, d'argent, de bismuth, d'antimoine, d'arsenic et d'étain. Le plomb récupéré à partir de sources secondaires peut contenir des impuretés similaires ; il s'agit principalement d'antimoine et de cadmium. Il existe deux procédés d'affinage du plomb brut : l'affinage électrolytique et l'affinage pyrométallurgique. Le premier utilise des anodes faites de plomb d'œuvre décuvré et des cathodes de départ faites de plomb pur. L'affinage électrolytique est un procédé extrêmement coûteux ; il est donc rarement utilisé.

L'affinage pyrométallurgique est réalisé dans une série de cuves chauffées indirectement au mazout ou au gaz [tm 4, HMIP Pb 1993 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. Le cuivre est le premier élément à être éliminé ; il se sépare sous forme de scories de sulfure. Si le métal brut est pauvre en soufre, il faut en ajouter sous la

forme de poudre de soufre ou de pyrite. Les scories de sulfure sont éliminées de la surface du métal au moyen d'écraieurs mécaniques qui les déversent dans des conteneurs.

L'élimination de l'arsenic, de l'antimoine et de l'étain se fait par oxydation. Le procédé couramment utilisé pour cela généralement appelé « adoucissement du plomb », repose sur une réaction avec un mélange de nitrate de sodium et d'hydroxyde de sodium, suivie d'un écrémage mécanique destiné à éliminer les scories contenant des oxydes. On peut également utiliser de l'air/de l'oxygène comme agent oxydant. Selon la composition du plomb brut (teneur en impuretés), le mélange de sels fondus peut être granulé dans l'eau et les impuretés séparées au moyen d'un procédé hydrométallurgique.

La désargentation s'effectue au moyen du procédé Parkes, qui repose sur la solubilité préférentielle de l'argent dans le zinc. On ajoute du zinc au plomb à une température d'environ 470 °C, puis on laisse refroidir le mélange jusqu' à 325 °C. Un alliage argent-plomb-zinc se sépare et forme une croûte à la surface. Cette croûte est éliminée et on sépare le zinc de l'argent par distillation sous vide. L'argent d'œuvre est soumis à un affinage supplémentaire à l'aide d'oxygène pour produire de l'argent brut. L'excès de zinc est éliminé du plomb désargenté par distillation sous vide puis traitement à l'hydroxyde de sodium.

On élimine le bismuth par traitement à l'aide d'un mélange de calcium et de magnésium (procédé Kroll-Betterton). Un alliage calcium-magnésium-bismuth apparaît sous la forme de scories à la surface du plomb ; celles-ci sont éliminées par écrémage avant d'être oxydées à l'aide de chlorure de plomb, de chlore gazeux ou d'un mélange d'hydroxyde de sodium et de nitrate de sodium. L'oxyde de calcium-magnésium est éliminé par écrémage. On récupère un alliage bismuth-plomb qui subit un affinage supplémentaire permettant d'obtenir du bismuth.

Le plomb pur est coulé en blocs ou en lingots. Les fumées, les scories, les litharges et autres résidus sont généralement fondus dans un petit haut fourneau ou un four rotatif pour produire un plomb d'œuvre qui sera réutilisé dans le circuit d'affinage.

La fusion et la préparation des alliages s'effectuent généralement dans des fours à creuset ou des cuves à chauffage indirect (mazout, gaz ou chauffage électrique). Le plomb affiné est fondu dans une cuve puis on ajoute les éléments d'alliage. La régulation de la température du bain peut jouer un rôle-clé. Le plomb et ses alliages sont généralement coulés dans des moules en fonte permanents [tm 4, HMIP Pb 1993].

On utilise des moules permanents et des machines à couler à transporteur pour produire des blocs, des dalles et des lingots. Les machines à couler en continu servent à produire des barres qui seront réduites et transformées en fil de plomb. L'aspiration des fumées est effectuée au niveau des canaux d'alimentation et des trous de coulée.

5.1.5 Zinc primaire

Le zinc peut être produit à partir de matières premières primaires par des procédés pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques. Encore utilisés dans d'autres régions du monde, les premiers ont progressivement été abandonnés et ne sont plus utilisés au sein de l'Union européenne pour les concentrés de zinc simples. Parmi les facteurs déterminants figurent la nécessité de procéder à une étape de distillation supplémentaire pour obtenir du zinc de haute pureté et le rendement d'extraction relativement faible. Le procédé pyrométallurgique utilisant des fours Imperial Smelting (ISF) occupe néanmoins toujours une place importante dans l'UE parce qu'il permet de traiter simultanément des concentrés plomb-zinc complexes et des matières premières secondaires, et d'obtenir du plomb et du zinc commercialisables. Cette méthode permet également de consommer les résidus provenant d'autres procédés [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

5.1.5.1 Procédé pyrométallurgique

Cette méthode est utilisée pour les concentrés mixtes zinc/plomb et les matières premières secondaires ; elle repose sur le procédé Imperial Smelting, décrit ci-dessus dans les paragraphes consacrés à la production du plomb et illustré dans la section 2.6. Le four électro-thermique est utilisé dans d'autres régions du monde. Le zinc obtenu par procédé Imperial Smelting peut contenir des quantités variables de cadmium, de plomb, de cuivre, d'arsenic, d'antimoine et de fer ; c'est pourquoi ce procédé comprend une étape d'affinage.

Le zinc obtenu par procédé ISF est affiné par distillation de reflux dans des colonnes comportant un nombre élevé de plateaux réfractaires (distillation New Jersey). Les extrémités inférieures des colonnes sont chauffées au gaz naturel par l'extérieur. Les extrémités supérieures ne sont pas chauffées et maintiennent une température suffisamment basse pour refluer les métaux à point d'ébullition plus élevé avant que les vapeurs ne passent dans un condenseur [tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. La colonne à distiller de type New Jersey s'utilise également pour les matières secondaires à base de zinc [tm 120 TU Aachen 1999].

La distillation s'effectue en deux étapes : dans un premier temps, on sépare le zinc et le cadmium du plomb, puis on sépare le cadmium du zinc. Lors de la première étape, le zinc en fusion est chargé dans une colonne dans laquelle s'effectue la distillation de la totalité du cadmium et d'une partie importante du zinc. Ce mélange est condensé puis amené directement dans une seconde colonne. Celle-ci fonctionne à une température légèrement inférieure pour distiller principalement le cadmium qui condense sous forme d'alliage zinc-cadmium. Cet alliage est transféré vers une unité d'affinage du cadmium. Le métal qui s'écoule du fond de la seconde colonne est du zinc de haute qualité (SHG) d'une pureté de 99,995 % [tm 120 TU Aachen 1999].

Le métal recueilli au fond de la première colonne est du zinc contenant des impuretés de plomb, d'étain, d'arsenic, de fer, d'antimoine et de cuivre. Cet alliage est refroidi pour séparer le plomb, recyclé dans le condenseur à pulvérisation de l'ISF, d'un composé intermétallique de fer, de zinc et d'arsenic qui est recyclé dans l'ISF lui-même.

Le zinc est ensuite soumis à un traitement au sodium destiné à éliminer l'arsenic et l'antimoine résiduels sous forme d'arséniures et d'antimoniures de sodium, qui sont eux aussi recyclés dans l'ISF. Le zinc ainsi

produit est d'une qualité inférieure (GOB), mais est exempt de cadmium et s'utilise principalement pour la galvanisation.

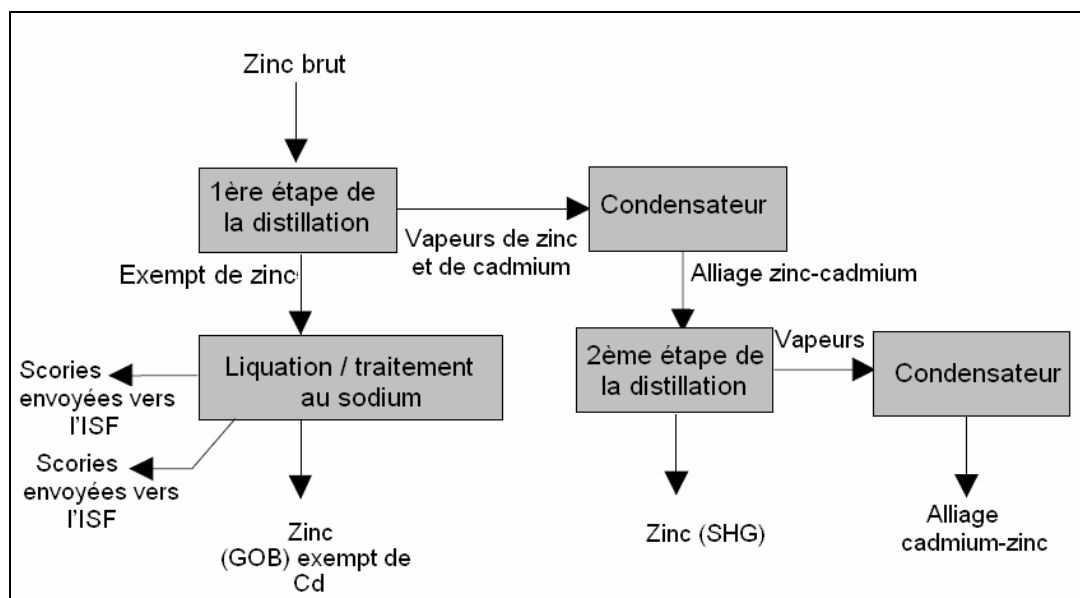


Figure 5.4 : Schéma représentant la distillation du zinc/cadmium [tm 102, DFIU Zn 1999]

5.1.5.2 Procédé hydrométallurgique

Le procédé hydrométallurgique s'applique aux concentrés de sulfures de zinc (blendes), d'oxyde de zinc, de carbonate de zinc ou de silicate de zinc ; il représente environ 80 % de la production mondiale totale [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. La majorité des unités de production de l'Union européenne utilisent le procédé électrolytique, qui représente une capacité de production totale de 1 665 000 t/an en 1997.

Les concentrés de sulfure sont tout d'abord grillés dans des fours de grillage à lit fluidisé pour produire de l'oxyde de zinc et du dioxyde de soufre. Le grillage est un processus exothermique qui ne nécessite aucun combustible supplémentaire, et la chaleur générée est récupérée. A sa sortie du four, l'oxyde de zinc (calcine) est recueilli et refroidi. Les effluents gazeux des fours de grillage sont traités dans des filtres électrostatiques haute température pour éliminer les poussières (qui sont envoyées dans la calcine). Les autres poussières et métaux volatils (Hg ou Se, par ex.) sont éliminés dans une chaîne de traitement du gaz comprenant des systèmes d'épuration et des électrofiltres humides. Le dioxyde de soufre est ensuite converti en acide sulfurique dans un système de récupération classique [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102 DFIU Zn 1999 ; tm 12, HMIP Zn 1993 ; tm 101 NL Zn 1998 ; tm 120, TU Aachen 1999].

La lixiviation de la calcine s'effectue en un certain nombre d'étapes successives à l'aide d'acide sulfurique chaud à concentration croissante. Les étapes initiales dissolvent des quantités limitées de fer, tandis que les étapes finales en dissolvent des quantités importantes. Le processus de lixiviation est réalisé dans différents réacteurs à cuves ouvertes, hermétiques et/ou pressurisées ou une combinaison de ceux-ci [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

Le procédé peut être stoppé après la lixiviation neutre. Les résidus de lixiviation sont envoyés vers un four ISF et ajoutés à la charge de l'ISF. Le zinc, le plomb et l'argent sont récupérés sous forme de métaux, et le soufre sous forme de H_2SO_4 . Il est possible d'utiliser un four Waelz à la place du four ISF, mais dans ce cas l'absorption du SO_2 est nécessaire.

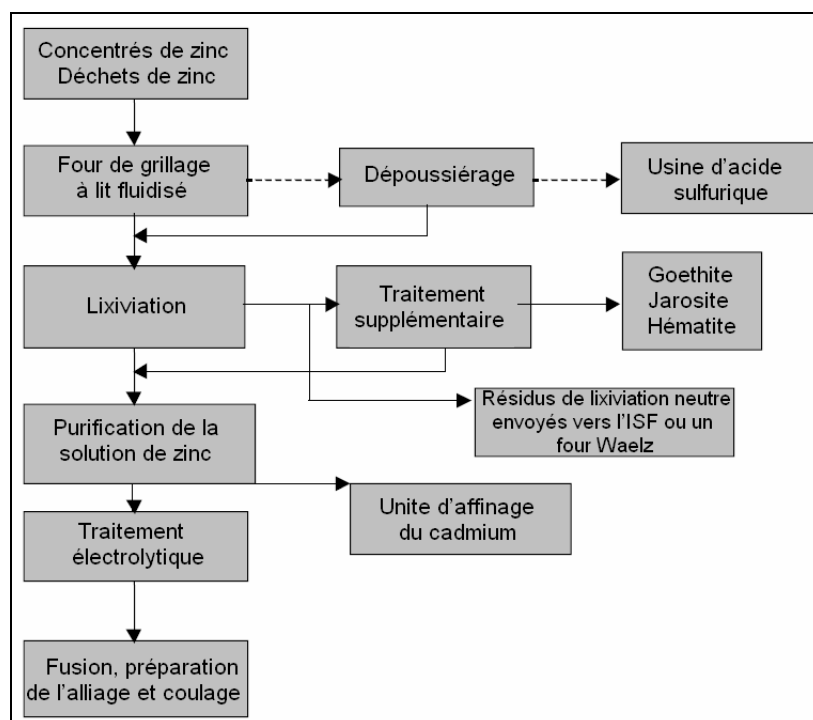


Figure 5.5 : Schéma représentant le traitement hydrométallurgique du zinc

D'autres métaux sont également dissous au cours du traitement et sont éliminés après la lixiviation. Le fer est la principale impureté ; il est précipité essentiellement sous trois formes : la jarosite, la goethite et l'hématite. La forme de ces précipités a été utilisée pour donner un nom aux procédés associés [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102 ; DFIU Zn 1999]. Voici les étapes de la précipitation :

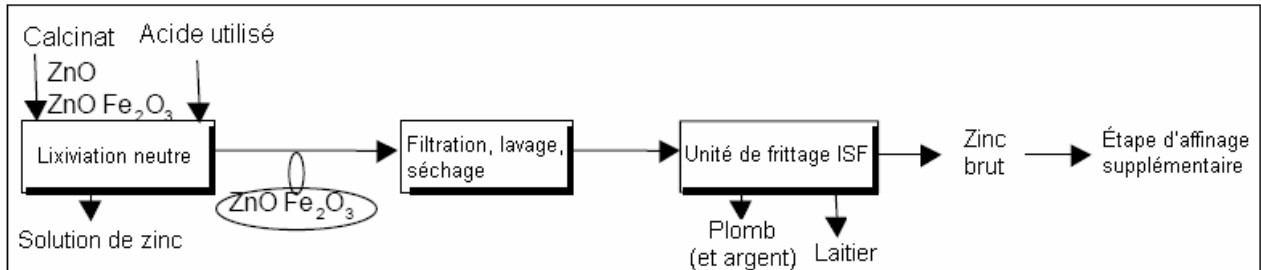
- précipitation sous forme de jarosite par neutralisation au moyen d'ammoniac et de calcine de zinc. Cette phase peut comprendre jusqu'à trois étapes si l'on souhaite récupérer le plomb ou l'argent. On utilise également un procédé à une seule étape appelé « procédé de conversion » ;
- précipitation sous forme de goethite par pré-réduction à l'aide de sulfure de zinc, ré-oxydation à l'aide d'oxygène et neutralisation à l'aide de calcine de zinc ;
- précipitation sous forme d'hématite par pré-réduction à l'aide de dioxyde de soufre ou de sulfure de zinc et précipitation par oxygène dans un autoclave. On obtient dans ce cas un résidu de soufre et un résidu de fer.

Les principales différences entre les précipités du fer sont leur volume et leur filtrabilité respectifs. On observe par ailleurs des écarts considérables au niveau des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation associés aux différents procédés [tm 120 TU Aachen 1999]. L'équilibre entre ces coûts et les coûts d'élimination des résidus peut être influencé par des coûts indépendants du procédé. Du fait du volume limité de résidus produits et du potentiel que semblait présenter l'hématite comme matière première pour la production de fer, le procédé de l'hématite semblait très avantageux. Il n'a malheureusement pas fait la preuve de sa viabilité et la sidérurgie n'a pas retenu l'hématite comme matière première potentielle.

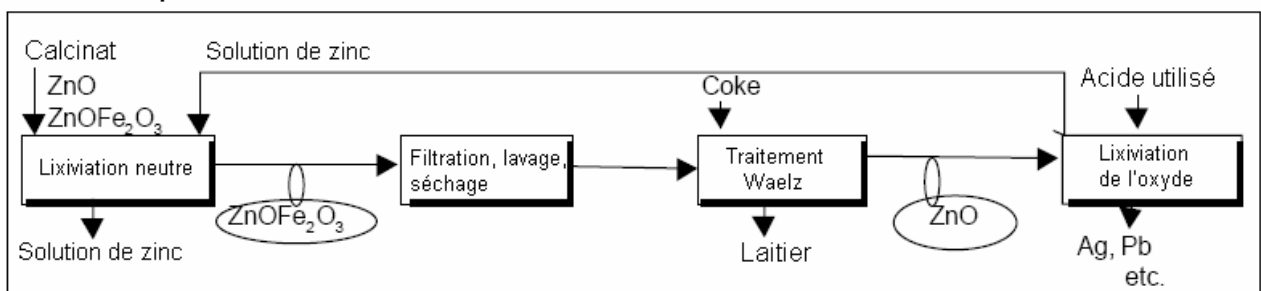
Il semble que le procédé de la jarosite assure un taux élevé de récupération du zinc, même à partir de concentrés contenant 10 % de Fe [tm 139, Finlande Zn 1999]. Ce type de résultat n'est possible à l'aide du

procédé de la goethite que si la calcine (ou ZnO) utilisée pour l'étape de précipitation présente une faible teneur en fer.

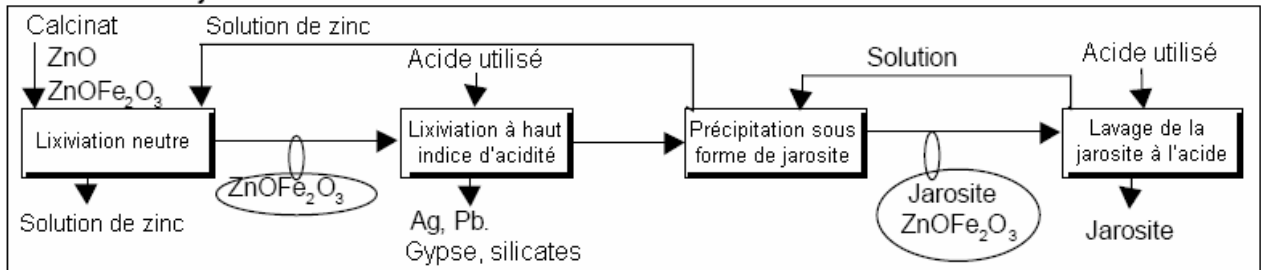
Procédés ISF à lixiviation neutre



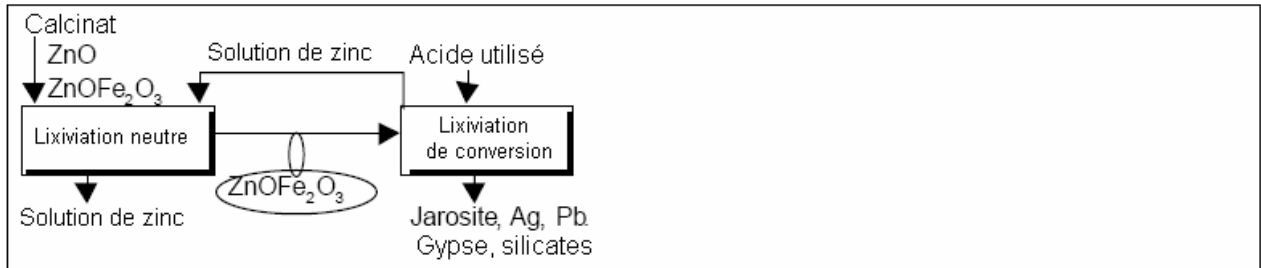
Traitement par lixiviation neutre dans un four Waelz



Procédé de la jarosite



Procédé de conversion



Procédé de la goethite

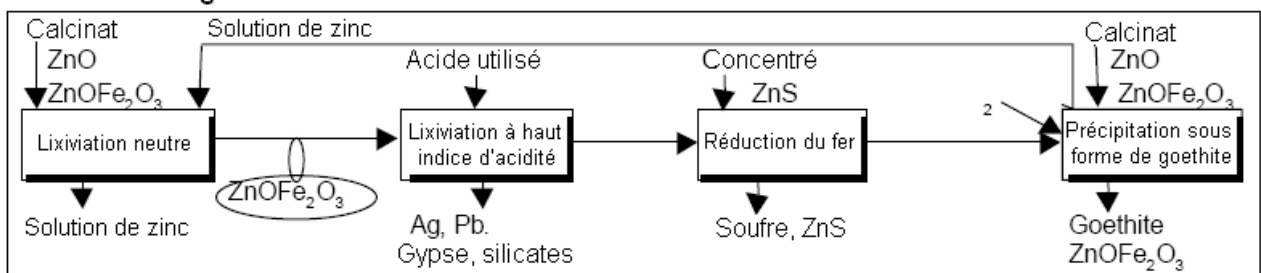
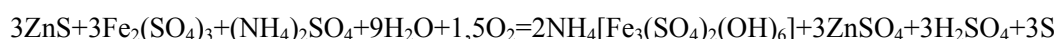


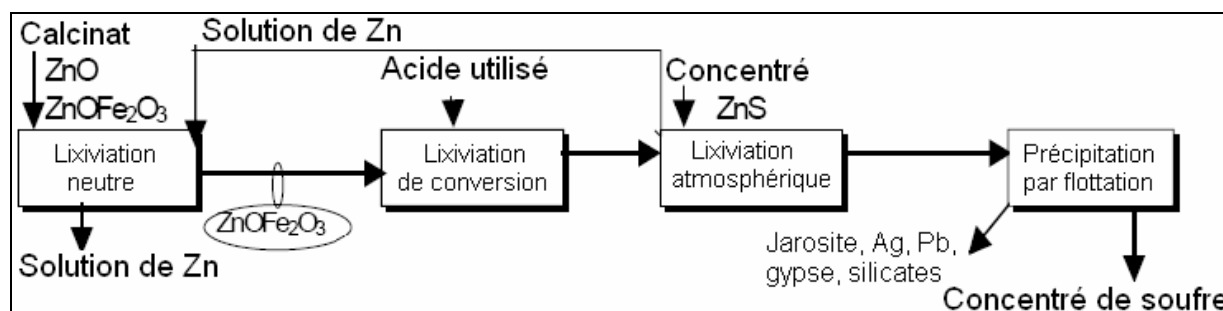
Figure 5.6 : Schémas de procédé simplifiés de quelques techniques d'élimination du fer

Il existe deux applications dans lesquelles le concentré est lixivié directement sans calcination : celles des sociétés Korea Zinc et Outokumpu Zinc. Le procédé adopté par la première consiste à laisser le fer en solution au cours de la lixiviation, puis à le précipiter lors d'une autre étape sous forme de goethite ; chez Outokumpu, le fer est précipité sous forme de jarosite pendant la lixiviation des sulfures.

Le concentré, les boues récupérées à l'issue du procédé de conversion et l'acide venant des électrolyses sont chargés dans les réacteurs dans lesquels la lixiviation s'effectue par barbotage d'oxygène dans les boues. Le reste du fer dissous dans la solution obtenue par procédé de conversion et le fer dissous à partir du concentré sont précipités sous forme de jarosite :



Un concentré de soufre est séparé des boues par flottation et stocké à l'écart du résidu de jarosite. Ce concentré de soufre n'est pas utilisé pour produire de l'acide sulfurique et constitue un déchet dangereux, comme la goethite et la jarosite. Les équipements nécessaires à ce procédé présentent de nombreuses similitudes avec ceux que l'on emploie traditionnellement lors du traitement hydrométallurgique du zinc. Un schéma du procédé exploité par Outokumpu Zinc est présenté ci-dessous [tm 139, Finland Zn 1999].

**Figure 5.7 : Procédé de lixiviation du concentré**

Quels que soient les résidus produits par les différentes options de procédés, l'extraction du zinc est optimisée par un lavage des résidus. Les autres métaux solubles peuvent être traités par précipitation sous forme d'hydroxydes ou de sulfures. Les résidus sont stockés dans des centres d'enfouissement, généralement situés au niveau ou à proximité du site, de façon à ce qu'ils soient isolés des nappes phréatiques et des eaux de surface. L'eau de la zone de stockage est normalement réinjectée dans le procédé. Des développements sont en cours visant à éviter la formation de résidus ou, du moins, à les rendre plus inertes par fixation ; le lecteur trouvera davantage d'informations à ce sujet dans la section intitulée « Techniques émergentes ».

Le boues provenant de l'étape de lixiviation finale sont décantées ; la solution de surverse est ensuite traitée pour éliminer les impuretés. Les matières solides présentes dans le dépôt sont filtrées puis lavées sur un filtre. Le gâteau de filtration est éliminé et le filtrat est recyclé dans le process. Il existe différents schémas de procédé, qui dépendent de facteurs tels que le choix du procédé d'élimination du fer et les techniques intégrées dont on dispose pour récupérer les impuretés.

Par exemple, avant d'être éliminés, les résidus de lixiviation subissent ainsi un traitement plus ou moins complet sous la forme d'une nouvelle lixiviation ou de techniques de séparation physique [tm 120 TU Aachen 1999]. Ce traitement a une incidence sur les taux de récupération et la composition des sous-produits éventuels de plomb/argent.

La purification de la solution contenant du zinc comprend un certain nombre d'étapes consécutives. Le procédé à utiliser dépend des concentrations des différents métaux contenus dans le concentré et variera en conséquence. Les procédés de base comprennent l'utilisation de poussière ou de poudre de zinc destinées

à précipiter les impuretés telles que Cu, Cd, Ni, Co et Tl. La précipitation du cobalt et du nickel repose également sur l'utilisation d'un second réactif tel que des oxydes d'arsenic ou d'antimoine. La température varie d'une usine à l'autre. D'autres réactifs tels que de l'hydroxyde de baryum et du diméthylglyoxime peuvent également servir à extraire le plomb et le nickel. Le mode de récupération du sous-produit de cuivre peut déterminer le choix du procédé.

De l'hydrogène peut être émis, et la formation d'arsine ou de stibine est surveillée. La collecte et le traitement des émissions gazeuses dépendent de la présence de ces gaz et de la conception d'ensemble du site. Les opérations peuvent s'effectuer à l'air libre ou dans des bâtiments fermés, mais il est indiqué que l'épuration des gaz provenant des réacteurs au moyen d'une solution oxydante constitue la solution la plus efficace pour éliminer l'arsine.

La solution purifiée passe dans une cellule où le zinc subit une extraction électrolytique effectuée au moyen d'anodes de plomb et de cathodes en aluminium. Le zinc se dépose au niveau des cathodes et de l'oxygène se forme au niveau des anodes, où de l'acide sulfurique est également généré avant d'être recyclé dans l'étape de lixiviation. Ce processus entraîne la formation d'un brouillard acide. Différents couvercles sont placés sur les cellules dans le but de minimiser ce phénomène. L'air de ventilation de la salle des cellules peut être dévésiculé, ce qui permet de récupérer le brouillard acide. L'électrolyse induit un dégagement thermique ; cette chaleur est éliminée par un circuit de refroidissement, ceci peut être conçu pour optimiser l'équilibre de la consommation d'eau induite par le procédé, mais peut aussi constituer une source de brouillard supplémentaire.

La couche formée sur les cathodes est prélevée automatiquement ou manuellement avant d'être fondue dans des fours électriques afin d'élaborer des alliages [tm 120 Tu Aachen 1999]. Une petite partie du zinc produit est transformée en poudre ou en poussière de zinc destinée aux étapes de purification. Ceux-ci peuvent être produits par atomisation dans l'air, l'eau, ou centrifuge d'un flux de zinc en fusion ou par condensation des vapeurs de zinc en atmosphère inerte.

L'une des principales difficultés associées au procédé de traitement hydrométallurgique est l'élimination ou l'utilisation des précipités de fer. Leur élimination s'effectue à l'heure actuelle au moyen de sites de confinement spéciaux, mais la pression exercée sur les sites d'enfouissement ne cesse de croître ; une autre section du présent document analyse ce facteur et propose une évaluation des différentes options existantes. La section intitulée « Techniques émergentes » passe en revue les différentes approches actuellement à l'étude pour permettre l'utilisation de ces résidus.

Une méthode alternative permettant d'éviter la production de ces déchets irréductibles consiste à limiter le traitement à une lixiviation neutre. Dans ce cas, le fer reste présent dans les résidus de lixiviation, de même qu'une importante fraction du zinc. Ces résidus sont réutilisés comme charge pour un procédé pyrométallurgique permettant de récupérer le zinc, le plomb, l'argent, le soufre et de transférer le fer dans un laitier.

5.1.6 Zinc secondaire

La consommation annuelle de zinc en Europe est couverte, à hauteur de 30 % environ, par du zinc secondaire ou recyclé. Près de 50 % de ce zinc secondaire est recyclé au sein des industries utilisatrices ou consommatrices. Cela est vrai notamment dans le secteur de la galvanisation et du laiton ; les déchets métalliques issus de la fabrication ou du traitement des produits peuvent être recyclés presque immédiatement.

Parmi les principaux résidus et déchets métalliques associés à l'industrie du zinc secondaire figurent :

- les poussières formées lors de l'élaboration des alliages ;
- les résidus de l'industrie du moulage sous pression ;

- les cendres et les mattes de fond et de surface du secteur de la galvanisation ;
- les vieilles toitures et autres matériaux en feuilles ;
- la fraction non-ferreuse provenant du broyage de véhicules usagés et d'autres produits constitués principalement d'acier ;
- les poussières recueillies dans les fours à arc utilisés dans la fabrication de l'acier et de la fonte ;
- les résidus des applications chimiques du zinc et des pneus brûlés.

Le type de procédé utilisé pour la récupération du zinc dépend de la forme et de la concentration du zinc, ainsi que de son degré de contamination [tm 120 TU Aachen 1999].

5.1.6.1 Procédés généraux

On utilise des techniques de séparation physique, de fusion et d'autres traitements à haute température. Les chlorures sont éliminés et les résidus servent à produire du zinc métal ou des alliages qui seront réutilisés, du métal impur ou de l'oxyde, qui subiront une étape d'affinage supplémentaire lors des procédés de production du zinc primaire. Ils peuvent également subir un traitement supplémentaire destiné à produire de l'oxyde de zinc, de la poudre ou de la poussière de zinc de qualité commerciale [tm 120 TU Aachen 1999 ; tm 206 TGI 1999].

Le détail des procédés est très souvent confidentiel, mais il est possible de présenter quelques exemples de ces traitements spécifiques :

- les cendres recueillies dans les ateliers de galvanisation dans lesquels sont traités des pièces, des fils et des tubes sont essentiellement constituées d'un mélange de zinc métal et d'oxyde de zinc contaminé par de l'ammonium et du chlorure de zinc. Les cendres passent dans un broyeur à boulets pour libérer les phases. La séparation s'effectue en balayant le broyeur à l'aide d'un flux d'air qui entraîne les constituants non-métalliques, recueillis ensuite dans un filtre à manches. Le broyeur peut également être muni d'un crible qui laisse passer la fraction fine non-métallique et retient la fraction grossière métallique. Dans ces deux procédés, la fraction métallique est extraite du broyeur, fondue puis coulée en lingots qui seront revendus, réutilisés ou retraités ;
- les scories de fond (aussi appelées matte ou zinc du commerce) sont un alliage zinc-fer présentant également du plomb, qui se forme et s'accumule dans les fours de maintien et les cuves utilisées pour la galvanisation discontinue. En cas de colmatage du four ou de la cuve, on a recours à des systèmes d'extraction automatiques. Les scories de surface sont un alliage zinc-fer-aluminium formé par la galvanisation continue à chaud. Les scories ou résidus d'écémage et autres déchets de l'industrie du moulage sous pression contiennent un mélange de zinc métal et d'oxyde de zinc avec, un peu ou pas de chlorures. Les modes de traitement présentés ci-dessus sont tous utilisés pour ces matériaux. Il en va de même pour les vieilles toitures et autres matériaux en feuilles, ainsi que pour les résidus des applications chimiques du zinc ou des produits à base de zinc ;
- le traitement des véhicules usagés dans une série de broyeurs produit des résidus. Après élimination de la fraction non-métallique, la fraction non-ferreuse est isolée des autres produits à base d'acier par séparation magnétique. La séparation par différence de densité et d'autres techniques sont ensuite utilisées pour traiter la fraction non-ferreuse avant que celle-ci ne subisse une fusion sélective permettant de récupérer le zinc ;

Les résidus sont fondus en deux étapes dans un four à réverbères chauffé au gaz. Le plomb est tout d'abord fondu à 340 °C avant d'être vidangé puis coulé en lingots. Lors de la seconde étape, on augmente la température jusqu'à 440 °C pour permettre la fusion du zinc, qui est ensuite vidangé puis coulé en lingots. Un autre procédé consiste à utiliser un four rotatif à chauffage indirect présentant un garnissage

interne perforé. Le zinc fond et s'écoule par le garnissage dans un four de maintien d'où il sera coulé en lingots. Il est toujours nécessaire de procéder à une étape d'affinage supplémentaire.

Les résidus, notamment les poussières provenant des fours électriques à arc utilisés pour la fabrication de l'acier, servent également à produire de l'oxyde de zinc. Il est possible d'utiliser des fours Waelz ou des fours de vaporisation du laitier.

5.1.6.2 Fours Waelz

Le procédé vise à séparer le zinc (et le plomb) des autres matériaux, là encore par réduction, évaporation, et oxydation du zinc (et du plomb) [tm 102, DFIU Zn 1999 ; tm 120 TU Aachen 1999].

Les poussières, les autres matières premières secondaires et les fines de coke sont chargées dans des silos, mélangées et parfois agglomérées. Ce mélange est ensuite envoyé directement vers le système d'alimentation du four ou stocké temporairement. En fonction de la qualité de laitier désirée, il est possible d'utiliser des bascules pour réguler la quantité de matériaux réducteurs (coke) selon la teneur en zinc des matières premières et selon les fondants.

La température de fonctionnement normal des fours Waelz est d'environ 1 200 °C. Dans le four, les matières solides sont tout d'abord séchées puis chauffées par le contre-courant de gaz chaud et par contact avec les parois de garnissage réfractaire. En fonction de l'inclinaison, de la longueur et de la vitesse de rotation du four, le temps de séjour moyen des matériaux dans le four se situe entre 4 et 6 heures. L'atmosphère fortement réductrice du lit fixe réduit le zinc, le plomb et les autres métaux lourds. Le zinc et le plomb sont vaporisés dans l'atmosphère gazeuse ; les chlorures et les alcalins (en fonction de la basicité du laitier) sont évaporés avec les métaux lourds. Du fait de l'excédent d'air dans le four, les vapeurs métalliques sont oxydées. Le mélange d'oxydes est extrait du four en même temps que les gaz de procédé, puis isolé dans le système d'épuration du gaz.

Le système de traitement des gaz comporte généralement une chambre de décantation permettant d'éliminer les poussières grossières qui sont évacuées mécaniquement, un dispositif de refroidissement du gaz à l'eau et un électrofiltre permettant d'éliminer l'oxyde de Waelz. On utilise également un refroidissement à l'air suivi d'un filtre à manches. Au besoin, on peut également avoir recours à des procédés servant à minimiser et à réduire les dioxines, tels que présentés dans la section 2.8.

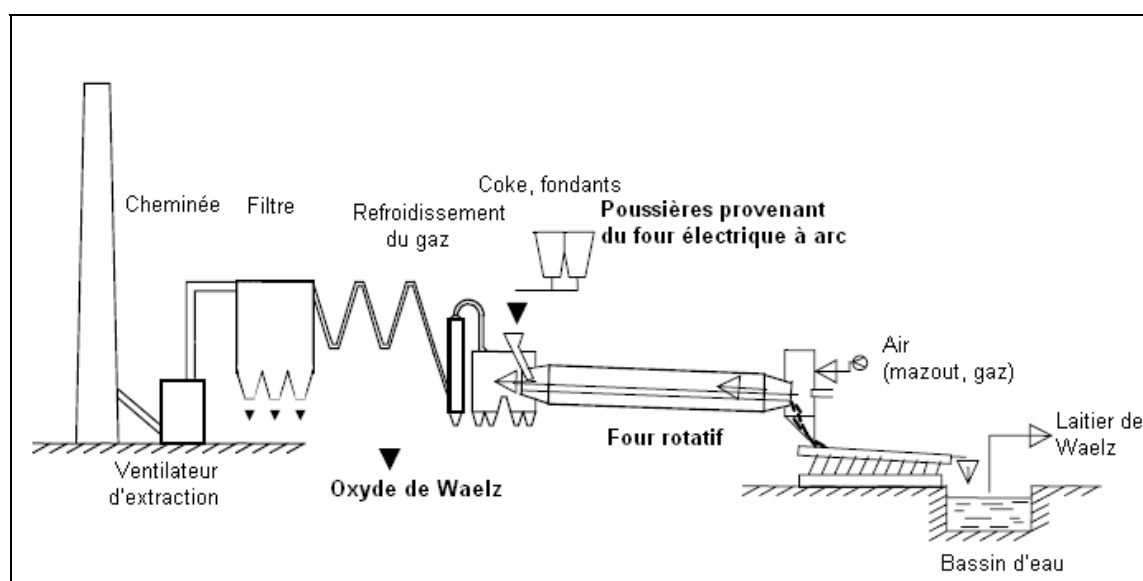
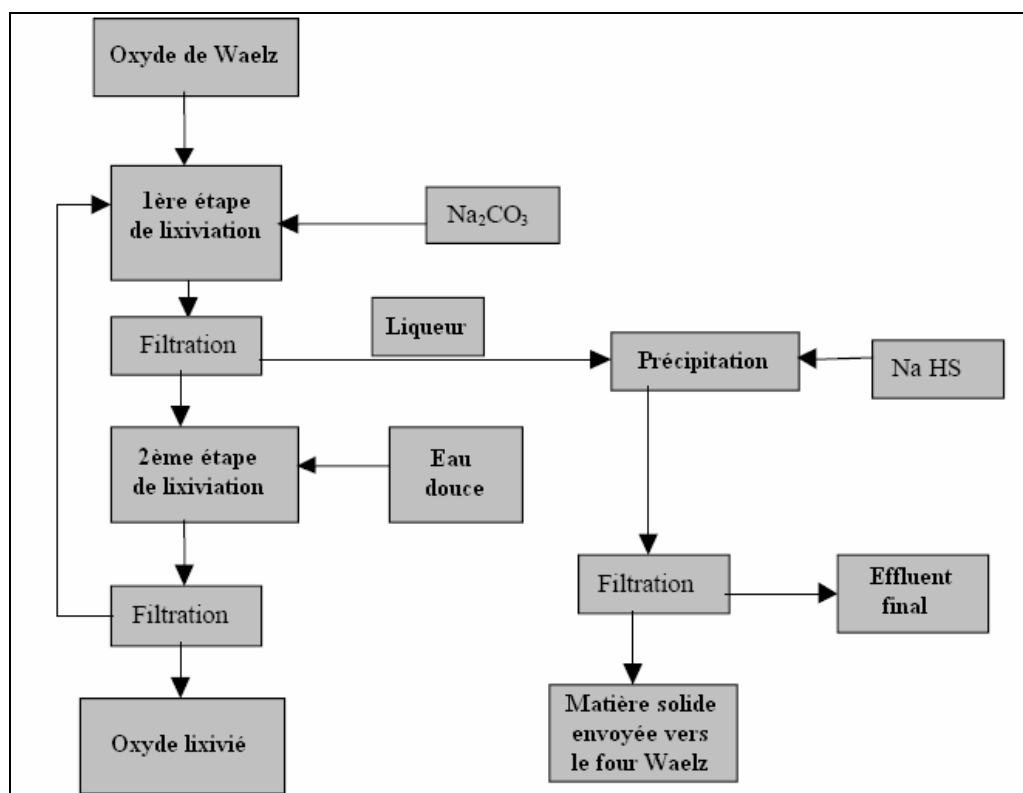


Figure 5.8 : Four de Waelz

Le laitier produit dans le four est extrait en continu par l'extrémité du four puis dirigé vers un dispositif de trempe. Une fois refroidi, criblé et concassé, le laitier est utilisable comme matériau utilisé dans le secteur des travaux publics (construction de routes, par ex.). Il peut en outre servir de fondant pour la production de clinker de ciment ou constituer une source de fer pour le secteur sidérurgique.

L'oxyde Waelz obtenu peut être soumis à différents traitements. Le traitement le plus simple est le briquetage à chaud ou le frittage, grâce auquel l'oxyde peut être vendu à des usines de traitement pyrométallurgique du zinc (ISF, par ex.). Si la teneur en oxyde de plomb est élevée, une étape de calcination peut également être effectuée pour évaporer le plomb.

L'oxyde Waelz peut également être lixivié dans un procédé en deux étapes, au moyen de carbonate de sodium puis d'eau, ce qui permet d'éliminer le chlorure, le fluorure, le sodium, le potassium et le soufre. Le produit final purifié est séché et peut servir de charge pour le procédé électrolytique du zinc.

**Figure 5.9 : Traitement par lixiviation de l'oxyde de Waelz**

5.1.6.3 Procédés de vaporisation du laitier

Ces traitements servent également à récupérer le zinc à partir des résidus. Les poussières provenant des fours électriques à arc, la plupart des laitiers issus des opérations de fusion du plomb ainsi que d'autres résidus de réduction du zinc contiennent du plomb et du zinc qui seront perdus en l'absence de traitement supplémentaire. Ces matériaux peuvent être vaporisés en utilisant une source de carbone telle que du charbon, afin de récupérer le plomb et le zinc et de produire de la chaleur à partir du procédé [tm 120 TU Aachen 1999].

Les fours cyclones et les convertisseurs sont utilisés afin d'élever la température au-delà de 1 200 °C pour évaporer les métaux puis former des oxydes qui sont ensuite récupérés par filtration des gaz. Le four cyclone fonctionne avec de l'air enrichi en oxygène, tandis que le convertisseur fonctionne avec de l'air sous-stœchiométrique. L'excès de chaleur ainsi produit est dirigé vers une chaudière de récupération qui génère de l'électricité. Le laitier produit est utilisable dans le domaine de la construction.

5.1.7 Procédés de fusion et de préparation des alliages de zinc

La fusion et la préparation des alliages s'effectuent généralement dans des fours à creuset à chauffage indirect ou dans des fours à induction ; la température est régulée pour empêcher l'évaporation du zinc et la formation de fumées qui s'ensuit. Le plus souvent, le combustible utilisé est du gaz ou du mazout. Le brûleur peut être situé à l'extérieur du creuset, lui-même placé dans une unité de combustion, ou à l'intérieur du creuset en tant que tube thermoplongeur [tm 13, HMIP Zn 1993 ; tm 101, NL Zn 1998].

Dans les deux cas, la régulation de la température est essentielle, étant donné que la température de coulée ne doit pas dépasser 450 °C pour la plupart des compositions d'alliages afin d'éviter toute perte de métal par vaporisation. Les éléments d'alliages ajoutés se présentent généralement sous une forme solide, mais lors de certaines opérations, on ajoute de l'aluminium en fusion à partir d'un four de fusion contigu.

Lorsque l'on fabrique des alliages à partir de matières premières impures, il est nécessaire d'utiliser des fondants pour absorber les impuretés. Le fondant couramment utilisé contient du chlorure de zinc, du chlorure de magnésium et du silico-fluorure de sodium. L'utilisation de ce fondant entraîne une émission de tétrafluorure de silicium gazeux, éliminé par épuration par voie humide. Le tétrafluorure est décomposé pour former du fluorure d'hydrogène qui est absorbé par le dispositif d'épuration.

5.1.8 Procédés de coulée du zinc

La fusion du zinc s'effectue dans des fours électriques dans lesquels la température est régulée pour empêcher toute vaporisation. Le bain de zinc est écrémé régulièrement pour éliminer les matières solides (scories : oxyde de zinc et chlorure de zinc). On ajoute souvent un fondant pour réduire la perte de zinc dans les scories. Celles-ci peuvent être recyclées dans l'ISF ou le four de grillage dans le procédé électrolytique du zinc.

Le métal est généralement coulé dans des moules permanents fabriqués, la plupart du temps, en fonte. On utilise des machines à couler fixes ou équipées d'un transporteur continu.

On utilise des moules fixes et des machines à couler à transporteur pour produire des blocs et des lingots. Des machines à couler en continu servent à fabriquer des barres qui seront réduites et transformées en fil.

5.1.9 Production de poussière de zinc

La poussière de zinc est un produit destiné à d'autres procédés industriels ; elle sert également de réactif pour la méthode de purification de la solution de lixiviation. Le zinc en fusion obtenu à l'aide des techniques décrites ci-dessus est pulvérisé sous pression au moyen d'une buse d'atomisation, puis refroidi rapidement en atmosphère inerte pour produire de la poussière [tm 120 TU Aachen 1999]. La poussière peut également être produite par atomisation centrifuge, à l'air ou à l'eau, d'un flux de zinc en fusion. La poussière est récupérée dans un système de filtres à manches puis conditionnée ou acheminée vers le procédé ou emballée.

5.1.10 Cadmium

5.1.10.1 Production de cadmium à partir des procédés de fabrication du plomb et du zinc

Le cadmium est un sous-produit issu de nombreux procédés de récupération des métaux. La production de zinc et de plomb constitue la principale source de cadmium [tm 120 TU Aachen 1999].

Dans le four Imperial Smelting (ISF), il existe deux modes distincts de récupération du cadmium. Une partie du cadmium suit le zinc ; elle est finalement récupérée sous la forme d'un condensat lors de la deuxième étape de distillation. Le reste est récupéré à partir des poussières volantes récupérées par l'épuration des gaz réalisée avant l'unité de fabrication d'acide sulfurique. Après lixiviation à l'acide sulfurique, le cadmium est séparé de cette solution.

Le cadmium cimenté, récupéré après purification des solutions de zinc, est également affiné par procédé hydrométallurgique : le produit cimenté est lixivié dans un milieu d'acide sulfurique, la solution est purifiée, et on réalise l'électro-extraction du cadmium métal. La solution de ZnSO_4 purifiée est ensuite réutilisée dans le circuit principal de traitement du zinc.

Le cadmium est également récupéré sous la forme d'une solution de chlorure de cadmium au moyen d'un procédé d'échange d'ions. La solution est envoyée vers un tamis rotatif immergé avec une bande de zinc de haute qualité qui déclenche une réaction d'échange, ce qui entraîne la formation d'une éponge de cadmium et d'une solution de chlorure de zinc. Cette éponge, qui peut également être produite à partir de solutions de sulfate, est fondue avec des paillettes de soude caustique (hydroxyde de sodium) afin d'éliminer le zinc résiduel. Le produit obtenu est coulé et vendu ; s'il est impur, il subit une autre étape d'affinage. Le cadmium peut également être récupéré sous forme de carbonate, notamment par électro-extraction.

Dans l'unité d'affinage, le cadmium provenant de ces deux circuits est combiné puis distillé à haute température. Le condensat est du cadmium contenant environ 1 % de zinc et le trop-plein est du zinc de haute qualité. Le cadmium distillé est fondu avec de la soude caustique et du nitrate de sodium pour éliminer le zinc résiduel. Le cadmium récupéré par procédé hydrométallurgique est soumis au même type de traitements mais une étape de distillation sous vide est aussi utilisée.

5.1.10.2 Production de cadmium à partir des batteries

Le recyclage des batteries Ni/Cd constitue l'autre source principale de cadmium. Il existe différentes initiatives de recyclage qui alimentent le secteur en batteries qui seront triées et récupérées de façon automatique. Les batteries Ni/Cd subissent tout d'abord un prétraitement thermique destiné à éliminer les revêtements plastiques et à ouvrir les boîtiers. Une fois ouverts, les boîtiers sont chauffés dans une cornue hermétique pour évaporer puis condenser le cadmium, qui est ensuite coulé dans des moules. Les résidus de nickel et de fer sont ensuite recyclés. Chacune des étapes du procédé repose sur des systèmes d'extraction et de dépollution de haute qualité permettant d'éliminer les poussières, les métaux et les COV tels que les dioxines. Effectué par voie sèche, le traitement est isolé du réseau d'évacuation.

5.1.11 Production d'autres métaux (In, Ge, Ga, As, Te, Sb, Bi)

Les concentrés utilisés pour produire du zinc et du plomb contiennent parfois d'autres métaux. Ceux-ci ont tendance à se concentrer dans les laitiers, les scories, les poussières volantes et les résidus produits au cours du procédé, et ces résidus comprennent la charge utilisée pour ces métaux.

Les procédés de récupération peuvent être complexes et sont souvent confidentiels pour des raisons commerciales. Ils associent plusieurs techniques telles que la lixiviation, la cémentation, l'extraction par

solvant, le traitement au chlore, l'électro-extraction et la distillation sous vide. Ces procédés peuvent être suivis de techniques d'affinage de zone et de croissance des cristaux pour produire des métaux ultra-purs.

5.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les principaux problèmes environnementaux posés par l'industrie du plomb et du zinc sont la pollution de l'air et de l'eau et la production de déchets dangereux. Les usines disposent généralement de leurs propres systèmes de traitement des eaux usées, et celles-ci sont le plus souvent recyclées. De nombreux déchets sont réutilisés mais la majeure partie d'entre eux est constituée par les résidus de lixiviation qui ont un lourd impact sur l'environnement [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. Le secteur se caractérise également par un certain nombre de problèmes au niveau local, tels que les nuisances sonores. Du fait du danger que représentent certains flux de déchets solides et liquides, il y a également un risque important de contamination des sols.

Les tableaux suivants présentent la répartition des intrants et des sortants de certaines usines européennes de production de plomb et de zinc.

Intrant	[t/a]	Sortant	[t/a]
Matières premières primaires	125 000	Zinc	100 000
Matières premières secondaires	125 000	Plomb d'œuvre	35 000
Coke	100 000	Acide sulfurique	125 000 – 200 000
		Laitier de four ISF	70 000
		Carbonate de cadmium	n.d.

Tableau 5.3 : Intrants et sortants d'une usine à procédé ISF (1998) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrants	[t/a]	Sortants	[t/a]
Pâte de batterie et autres	82 000	Plomb	90 000
Concentrés de plomb	40 000	Acide sulfurique	25 000
Poussières volantes recyclées	34 000	Laitier	10 000
Fondants	3 500	Résidus de mercure	20
Charbon ou coke	7 100	Poussières volantes (réalimentées dans le four)	34 000
Oxygène	13 300		

Tableau 5.4 : Intrants et sortants du fourneau ISA Smelt (conception et données préliminaires) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrant	[t/a]	Sortant	[t/a]
Matériaux contenant du plomb	130 000	Plomb d'œuvre	90 000
Fondants (castine...)	20 000	Laitier	50 000
Azote	12 500	Acide sulfurique	60 000
Oxygène	46 000	Argent aurifère	250
Charbon (poussières)	12 000	Chlorure mercurieux	2 - 5
Gaz naturel	1 300	Carbonate de zinc-cadmium	100 - 150

Tableau 5.5 : Intrants et sortants de l'unité QSL (1997) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrant			Sortant		
<i>Matériaux de fusion</i> Déchets métalliques de batteries Autres matériaux de fusion Métal d'œuvre, déchets de plomb	[t/t Pb]	2,12	<i>Produits</i> Plomb et alliages de plomb Pâte de batterie Composés de polypropylène		
	[%]	63		[t/t Pb]	1
	[%]	21		[t/t Pb]	0,5
	[%]	16		[t/t Pb]	0,07
<i>Réactifs</i> Copeaux d'acier Coke de pétrole Soude	[t/t Pb]	0,14	<i>Résidus</i> Plastiques résiduels Laitier		
	[%]	46		[t/t Pb]	0,10
	[%]	32		[t/t Pb]	0,23
	[%]	22	<i>Autres</i> Gaz émis	[Nm ³ /t Pb]	70 000
<i>Autres</i> : Énergie électrique Gaz naturel Fragments de PP (provenant de l'extérieur)	[MWh/t Pb]	0,26			
	[MWh/t Pb]	1,19			
	[t/t Pb]	0,04			

Tableau 5.6 : Intrants et sortants d'une usine de récupération des batteries sans désulfuration (1998) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrant			Sortant		
<i>Matériaux de fusion</i> Déchets métalliques de batteries Autres matériaux de fusion Métal d'œuvre, déchets de plomb Poussières volantes	[t/t Pb]	1,41	<i>Produits</i> Plomb et alliages de plomb Sulfate de sodium Fragments de PP		
	[%]	79,0		[t/t Pb]	1
	[%]	3,8		[t/t Pb]	0,096
	[%]	16,6	<i>Résidus</i> Plastiques résiduels Laitier métallurgique	[t/t Pb]	0,051
	[%]	0,6		[t/t Pb]	0,108
<i>Réactifs</i> NaOH Copeaux d'acier Coke de pétrole Soude	[t/t Pb]	0,307		[t/t Pb]	0,18
	[%]	49,8	<i>Autres</i> Gaz émis	[Nm ³ /t Pb]	37 000
	[%]	9,4			
	[%]	17,6			
	[%]	23,1			
<i>Autres</i> : Énergie électrique Gaz naturel Vapeur	[MWh/t Pb]	0,20			
	[MWh/t Pb]	0,73			
	[MWh/t Pb]	0,84			

Tableau 5.7 : Intrants et sortants d'une usine de récupération des batteries avec désulfuration (1998) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrant	[t/a]	Sortant	[t/a]
Déchets métalliques de batteries	65 000	Plomb et alliages de plomb affinés	28 000
Plaques de batteries	4 000	Pâte de batterie	32 500
Déchets de plomb	6 000	Fins grains de PP	2 750
		Ebonite et séparateurs	3 500
		Laitier	3 300

Tableau 5.8 : Intrants et sortants d'une usine de récupération des batteries avec élimination de la pâte (1998) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Intrant	[par tonne de plomb d'œuvre]	Sortant	[par tonne de plomb d'œuvre]
Batteries usagées, sèches	1 100 kg	Plomb d'œuvre	1 000 kg
Autres déchets de plomb, déchets	320 kg	Poussières émises dans le flux gazeux	32 kg
Fondants (castine)	14 kg	Excès de laitier	50 kg
Coke (métallurgique)	109 kg	Récupération de laitier	500 kg
Autres intrants (fer)	67 kg	Effluents gazeux	18 200 Nm ³
Carbonate de plomb (provenant du traitement poussières à l'émission)	40 kg	Matte fer/plomb	140 kg
Laitier (récupéré)	500 kg		
Oxygène	43 Nm ³		
Gaz naturel	15 Nm ³		
Énergie électrique	107 kW/h		

Tableau 5.9 : Intrants et sortants d'une usine de récupération des batteries avec fusion des batteries entières (1998) [tm 102, DFIU Zn 1999]

Matériau	Description
Matières chargées	Concentrés (50 – 55 % Zn)
Produits	Zinc (99, 99 %) Cadmium Acide sulfurique
Déchets	Goethite ou jarosite 30 000 – 40 000 t/a Boue acide neutralisée (déchet spécial ou réutilisation de la boue)
Produits intermédiaires	Résidus de Pb/Ag 12 000 t/a Produits cimentés Résidus de lixiviation neutre
Capacité typique de production	Zn 100 000 t/a Acide sulfurique 175 000 t/a Cd 300 t/a

Tableau 5.10 : Données-types d'une unité de traitement électrolytique du zinc. Grillage – lixiviation – purification – électrolyse [tm 102, DFIU Zn 1999]

Métal %	Concentré de Zn	Résidus de lixiviation neutre	Cuivre cimenté *	Résidus de Pb/Ag *	Jarosite **	Goethite **
Zn	53	16 - 27	5,9	5,8	2 - 6	4 - 9
Fe	7,3	15 – 35		9	20 - 32	31 - 43
Pb	1,6	3,6		10 – 25	< 2	< 2
S	32	3 – 11		4	10 - 13	2 - 5
Cu	0,6	0,3 – 2,4	55	0,1	< 0,2	< 0,3
Cd	0,24	0,1 – 0,3	0,3	0,2	< 0,1	< 0,1
Ag	0,016	0,036		0,115	< 0,01	< 0,01
SiO ₂	1,7	4,0		12		

Note : *Composition, peut varier selon la concentration des matières chargées et le traitement appliqué.
 ** Les quantités dépendent de la teneur en Fe des matières chargées.

Tableau 5.11 : Composition classique des matières chargées et des produits d'une unité de production électrolytique du zinc

Intrants	[t/a]	Sortants	[t/a]
Résidus de Zn (poussières des fours électriques à arc, etc.)	90 000	Oxyde de Waelz	33 000
Poussier de coke	25 000	Laitier	70 000
Sable siliceux	13 000	Gaz de four (m ³ /a)	30 000
Carbonate de sodium	3 300	Eau traitée (m ³ /a)	150 000
NaHS (m ³ /a)	11		
Eau à usage industriel (m ³ /a)	300 000	Oxyde traité	30 000
Gaz naturel (Th 000/a)	7 900	Teneur en zinc	19 500
Énergie électrique MWh/a	5 700		
Gazole (m ³ /a)	440		

Tableau 5.12 : Intrants et sortants d'un four Waelz utilisant un procédé de lixiviation de l'oxyde en deux étapes

Intrants	[t/a]	Sortants	[t/a]
Résidus de cornue, secs	27 700	Oxyde de Waelz	17 000
Matériaux contenant du zinc (poussières des fours électriques à arc,...)	33 700	Laitier	48 200
poussier de coke	10 800	Gaz épuré [Nm ³ /a]	70 000 – 90 000
Silice	7 500		
Balayures, débris	2 100		
Air [Nm ³ /h]	5 000 – 10 000		
Chaux	1 000		
Énergie électrique [MWh/a]	4 620		
Gaz naturel [Nm ³ /a]	92 000		

Tableau 5.13 : Intrants et sortants d'une usine à four Waelz (1996/97) [tm 102, DFIU Zn 1999]

5.2.1 Énergie

Les besoins en énergie des différents procédés de fabrication du zinc et du plomb varient largement. Ils dépendent de la qualité de la charge et des produits, de l'utilisation de la chaleur latente ou résiduelle, et de la production de sous-produits. Les deux tableaux suivants représentent la demande énergétique moyenne des différents procédés.

Procédé	Électricité kWh/t Pb	Coke kg/t Pb	Charbon kg/t Pb	Gaz nat. Nm ³ /t Pb	Fioul l/t Pb	O ₂ Nm ³ /t Pb	Fer kg/t Pb
Four à cuve pour le Pb. Primaire	180 - 300	150 - 225		50 - 70			120 - 170
Four à cuve pour le Pb. Secondaire	50	100 - 140		35	1		65 - 110
Four rotatif secondaire avec système CX et production de Na ₂ SO ₄	160		60	65		90	30
QSL	*		100	20		330	
Kivcet	250*	105			25	450	
TBRC	450 - 550	40			30	140	

* Couvert en partie ou en totalité par la conversion de chaleur résiduelle.

Tableau 5.14 : Demande énergétique des différents procédés de production du plomb

Procédé	Énergie consommée pour :	Électricité kWh/t	Coke Kg/t	Gaz naturel Nm ³ /t
Électrolyse du zinc	1 t de zinc	4 100		
ISF & distillation New Jersey	1 t de zinc 1 t de métal	1 050 750	1 100 785	220 160
Four Waelz	1 t d'oxyde de waelz lixivié	200	850	20
Vaporisation du laitier	1 t de laitier	150	250	

Tableau 5.15 : Demande énergétique des différents procédés de traitement du zinc

5.2.2 Émissions dans l'air

Les émissions peuvent s'échapper du process soit par les cheminées, soit sous la forme d'émissions fugitives, selon l'âge de l'usine et les techniques utilisées. Normalement, les émissions à la cheminée font l'objet d'une surveillance constante ou périodique et d'un relevé.

Parmi les principales émissions dans l'air induites par la production de zinc et de plomb figurent :

- le dioxyde de soufre (SO₂) ainsi que d'autres composés soufrés et brouillards acides ;
- les métaux et leurs composés ;
- les poussières ;
- les COV et les dioxines ;
- les oxydes d'azote (NO_x) et autres composés azotés.

Les autres polluants sont considérés comme étant d'une importance négligeable pour l'industrie, en partie car ils ne sont pas présents dans le processus de production et en partie parce qu'ils sont immédiatement neutralisés (chlore, par ex.) ou sont présents à de très faibles concentrations. Les émissions sont, dans une large mesure, associées aux poussières (sauf le cadmium, l'arsenic et le mercure qui se présentent parfois en phase gazeuse) [tm 101, ML Zn 1998].

A partir du procédé, les sources d'émissions sont les suivantes :

- le grillage (la majeure partie des émissions se produisent au cours d'un arrêt imprévu) ;
- d'autres prétraitements (cassage des batteries, par ex.) ;
- le transport et la manutention des matériaux ;
- la fusion et l'affinage ;
- la lixiviation et la purification ;
- l'électrolyse ;
- la coulée ;
- les usines de production d'acide sulfurique.

Composé	Grillage Frittage Fusion	Lixiviation et purification	Électrolyse	Cassage des batteries	Coulée, etc.	Unité de production d'acide sulfurique
Oxydes de soufre	••*	•	•• (brouillard acide)	•	•	•••
Oxydes d'azote	•*				•	•
Poussières et métaux	•••*	•	•	•••	•••	
COV et dioxines	•(••)**				•*	
Note : ••• le plus important... • le moins important. * Les émissions directes issues des étapes de grillage ou de fusion sont traitées et/ou converties lors des étapes d'épuration du gaz et dans l'unité de fabrication d'acide sulfurique ; les émissions résiduelles de dioxyde de soufre et de dioxyde d'azote issues de l'unité de fabrication d'acide sulfurique sont encore à prendre en compte. Les émissions fugitives ou non captées provenant de ces sources sont également à prendre en compte. La fusion secondaire de la pâte de batterie est une source de SO ₂ . ** Des dioxines et des COV peuvent être présents en cas d'utilisation de matières secondaires contenant des dioxines ou contaminées par des matières organiques. Les procédés d'extraction par solvant servant à produire du Ga ou du Ge, etc., peuvent également être source de COV.						

Tableau 5.16 : Importance des rejets potentiels dans l'atmosphère dus à la production de plomb, de zinc et de cadmium

Outre les émissions liées aux process, il se produit des émissions fugitives. Les principales sources d'émissions fugitives sont les suivantes [tm 101, NL Zn 1998] :

- poussières provenant du stockage et de la manutention des concentrés (10 t/a) ;
- fuites des fours de grillage ou de fusion ;
- poussières des gaz émis par les cuves de lixiviation et de purification (1 t/a) ;
- gaz émis par les tours de refroidissement des unités de lixiviation et de purification (0,7 t/a) ;
- gaz émis par les tours de refroidissement du procédé électrolytique (0,8 t/a) ;
- poussières des gaz émis par les fours de coulée (1,8 t/a) ;
- sources diverses (0,7 t/a).

Bien que les émissions fugitives soient difficiles à mesurer et à estimer, certaines méthodes ont été utilisées avec succès (section 2.7). Le tableau suivant présente certaines données relatives aux émissions recueillies lors de la modernisation d'un procédé de production de plomb (abandon d'un haut fourneau au profit d'un procédé ISA Smelt) [tm 102, DFIU Zn 1999] ; il met en évidence le niveau potentiellement élevé des émissions fugitives.

Émissions	Installation classique (1990) [kg/a]			Installation ISA Smelt (1997) [kg/a]			Taux de réduction [%]		
	Contrôlées	Fugitives	Totales	Contrôlées	Fugitives	Totales	Contrôlées	Fugitives	Totales
Plomb	5 236	19 555	24 791	911	540	1 451	83	97	94,1
Cadmium	330	242	572	3,81	0,24	4,05	99	> 99	99,3
Antimoine	151	309	460	25,8	1,77	27,52	83	> 99	94
Arsenic	77,6	141,5	219,1	4,03	1,55	5,58	95	99	97,5
Thallium	21,9	16,1	38	1,27	< 0,01	1,27	94	> 99	96,7
Mercure	16,7	0,4	17,1	0,87	< 0,01	0,87	95	> 97	95
Dioxyde de soufre [t/a]	7 085	-	7 085	140,4	-	140,4	98	-	98
Note : Installation ISA Smelt : données préliminaires. Production de plomb : 96 724 t en 1990 et 86 941 t en 1997.									

Tableau 5.17 : Importance des améliorations d'une usine sur les émissions fugitives

5.2.2.1 Dioxyde de soufre et autres composés soufrés

Les principales sources d'émissions de dioxyde de soufre sont constituées par les émissions fugitives provenant des étapes d'oxydation, les émissions directes de l'usine de fabrication d'acide sulfurique et l'émission de soufre résiduel générée par la charge du four. Effectuées avec soin, l'extraction et la mise en étanchéité des fours empêchent les émissions fugitives ; les gaz collectés lors des étapes d'oxydation sont dirigés vers une installation d'épuration des gaz puis vers l'unité d'acide sulfurique.

Après épuration, le dioxyde de soufre présent dans le gaz émanant des étapes de frittage, de grillage ou de fusion directe est converti en trioxyde de soufre (SO_3). Le rendement se situe généralement entre 95 et 99,8 % selon l'unité d'acide sulfurique utilisée (absorption simple ou double), la concentration de dioxyde de soufre du gaz entrant et sa variation ou sa stabilité. Les effluents gazeux émis peuvent présenter des concentrations de SO_2 allant de 200 à 2 300 mg/Nm³. Une quantité infime de SO_3 n'est pas absorbée et est émise avec le SO_2 . Au cours du démarrage et de l'arrêt, il arrive que des gaz faiblement chargés soient émis sans conversion. Ces phénomènes doivent être identifiés pour chaque installation. De nombreuses entreprises ont réalisé des progrès importants dans le contrôle de procédé pour la prévention ou la réduction de ces émissions [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

L'aggloméré de plomb et certaines matières premières secondaires contiennent des résidus de soufre et de sulfates. On sait que 10 % de la teneur en soufre du concentré de plomb restent présents dans le matériau fritté alimenté dans les fours [tm 129, Madelin 1991]. De même, la teneur en sulfates des déchets de batteries peut être élevée, en fonction du mode de prétraitement retenu et selon que la pâte est incluse ou non dans les déchets. Dans la plupart des cas, le soufre est fixé dans le laitier ou d'autres sous-produits. L'étendue de cette fixation dépend des fondants utilisés et des autres métaux associés au procédé : par exemple, de la matte de cuivre peut être produite lorsque les concentrés de Pb/Cu sont traités conjointement. De la matte de Pb/Fe est produite dans des conditions réductrices lorsque l'on ajoute des tournures de fer. Dans d'autres cas, il peut se produire une émission de SO_2 , qui nécessite alors un traitement supplémentaire.

Au cours de l'électrolyse, des aérosols (acide sulfurique dilué et sulfate de zinc) sont émis dans la halle. Ces émissions quittent la cellule avec le processus de ventilation (naturelle) ou via les tours de refroidissement. Il s'agit d'une émission réduite, comparé à celles provenant de l'unité d'acide sulfurique, mais puisque cette émission se présente sous la forme d'aérosols, elle peut être traitée à l'aide de dévésiculeurs ou de systèmes de dépoussiérage [tm 101, NL Zn 1998]. Dans certains procédés, les cellules sont recouvertes de mousse ou de billes de plastique afin de limiter la formation de brouillard [tm 139, Finland Zn 1999]. Récemment, une installation a été modifiée en vue d'optimiser le grillage et de collecter les émissions fugitives générées par l'ensemble du procédé. Les émissions de dioxyde de soufre ont été réduites de 3 000 à 1 200 g par tonne de métal produite. Les émissions associées aux autres procédés sont énumérées ci-dessous.

Procédé	Produit	Production totale de métal [t/a]	Production de SO ₂ [g/t de métal]
Grillage et électrolyse	Zinc	105 000 – 235 000	2 500 – 5 500
ISF et unité de frittage	Zinc + Plomb	100 000 Zn 45 000 Pb	5 000 – 9 000
QSL	Plomb	90 000	1 000
ISA	Plomb	90 000	7 500
Batteries entières	Plomb	35 000	7 800
Batteries – pâte désulfurée	Plomb	35 000 – 40 000	1 070 – 2 000
Batteries sans pâte	Plomb	35 000	3 200
Batteries + excédent de pâte	Plomb	10 000	210 (désulfuration)
Four à cuve et unité de frittage du plomb	Plomb	110 000 Pb	10 000 – 45 000
Batteries – procédé MA	Plomb	33 000	6 600

Tableau 5.18 : Production de dioxyde de soufre associée à différents procédés de production du zinc et du plomb

Les brouillards provenant des équipements de cassage des batteries peuvent également être à l'origine d'émissions similaires. Les émissions générées par les fours de fusion dans lesquels sont chargés les constituants des batteries contiennent du dioxyde de soufre ; la concentration de SO₂ varie selon que la pâte est fondue, préalablement désulfurée, ou fixée avec le laitier. Les valeurs se situent généralement entre 50 et 500 mg/Nm³ [tm 102, DFIU Zn 1999].

5.2.2.2 Oxydes d'azote

Les étapes de grillage et de fusion sont des sources potentielles d'oxydes d'azote (NO_x). Ceux-ci peuvent être formés à partir des composés azotés présents dans les concentrés ou sous forme de NO_x thermiques. Une grande partie des NO_x peut être absorbée par l'acide sulfurique produit, et ceci peut affecter la qualité de celui-ci. Si de fortes concentrations de NO_x sont présentes à l'issue des étapes de grillage, il peut être nécessaire de traiter les gaz de grillage, tant pour assurer la qualité des produits que pour des raisons environnementales. Les autres fours utilisant des brûleurs oxycombustibles peuvent également présenter une réduction des NO_x. La fourchette d'émissions associée à l'ensemble de ces procédés se situe entre 20 et 400 mg/Nm³.

5.2.2.3 Poussières et métaux

Les poussières provenant des étapes de grillage et de fusion sont des sources potentielles d'émissions directes et fugitives de poussières et de métaux. Les gaz sont collectés puis traités par les procédés d'épuration des gaz de l'unité d'acide sulfurique. Les poussières sont éliminées puis réintroduites dans le procédé.

Les gaz générés par les condenseurs à pulvérisation de l'ISF, au niveau des colonnes de distillation et des trous de coulée, constituent également des sources potentielles de poussières et de métaux. Il est donc nécessaire de mettre en place un système d'extraction et de dépollution performant à ces emplacements afin d'empêcher les émissions fugitives. Le traitement et la trempe du laitier induisent également la formation de poussières. La fourchette d'émissions de poussières provenant de ces sources contrôlées se situe entre < 1 et 20 mg/Nm³. Les laitiers et les scories produits par la récupération du plomb des batteries

peuvent contenir de l'antimoine ; lorsque ces résidus deviennent humides, il peut se produire des émissions de stibine, qui est un gaz toxique.

Procédé	Produit	Production [t]	Zinc par tonne de métal [g]	Plomb par tonne de métal [g]
Grillage	Zinc	130 000 Zn	10	
Grillage	Zinc	215 000 Zn	45	
Grillage	Zinc	235 000 Zn	45	
Grillage	Zinc	105 000 Zn	11	
ISF et unité de frittage	Zinc + plomb	100 000 Zn 45 000 Pb	30 - 90	5 – 40
QSL	Plomb	90 000 Pb	7,2	10 - 20
ISA Smelt	Plomb	90 000 Pb	-	10 – 30
Batteries entières	Plomb	35 000 Pb		< 15
Batteries – pâte désulfurée	Plomb	40 000 Pb		10
Batteries – pâte désulfurée	Plomb	35 000 Pb		5 – 25
Batteries – pâte d'oxyde vendue	Plomb	35 000 Pb		5 – 25
Batteries + excédent de pâte	Plomb	10 000 Pb		5 - 25
Batteries – procédé MA	Plomb	33 000 Pb	-	20
Four à cuve et unité de frittage du plomb	Plomb	110 000 Pb	< 20	60 - 130
Grillage	Zinc	21 000 Zn	70	2

Tableau 5.19 : Émissions en masse de métaux associées à quelques procédés européens (émissions contrôlées uniquement)

L'élimination de l'air contenu dans les cuves de lixiviation et de purification peut entraîner l'émission de poussières et de métaux. Les étapes de purification du zinc s'accompagnent parfois d'une émission d'arsine. Les étapes de distillation et les unités de fabrication de cadmium peuvent émettre du cadmium.

Des aérosols sont émis dans la cellule et les équipements de cassage des batteries et peuvent contenir des métaux. La fourchette des émissions de brouillards et de poussières générés par ces sources se situe entre 0,1 et 4 mg/Nm³.

La fusion, la préparation des alliages, la coulée et les procédés relatifs aux poussières de zinc sont des sources potentielles d'émissions de poussières et de métaux. D'après les informations collectées, ces émissions de poussières se situent entre 200 et 900 mg/Nm³ dans le gaz brut [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. Grâce aux systèmes de collecte et de dépollution des fumées, les valeurs caractéristiques des gaz propres sont inférieures à 10 mg de poussières/Nm³ [tm 102, DFIU Zn 1999].

Le zinc représente environ 50 % des métaux associés aux émissions de poussières. La fusion, l'alliage et la coulée du zinc pur n'entraînent aucune émission de cadmium ni de plomb.

5.2.2.4 COV et dioxines

Certains procédés induisent la formation de dioxines dans la zone de combustion et dans la section de refroidissement du système de traitement des effluents gazeux (synthèse de novo), notamment si les matières premières secondaires alimentant le procédé présentent des constituants plastiques. La présence

de dioxines a également été observée dans certaines poussières émanant des fours Waelz utilisés pour traiter les poussières des fours électriques à arc.

5.2.3 Rejets dans l'eau

Les métaux et leurs composés, ainsi que les matières en suspension, sont les principaux polluants rejetés dans l'eau. Les métaux concernés sont les suivants : Zn, Cd, Pb, Hg, Se, Cu, Ni, As, Co et Cr [tm 26, PARCOM 1996 ; 28, WRC 1993 tm 101 ; tm 102, DFIU 1999].

Parmi les autres substances principales figurent les fluorures, les chlorures et les sulfates.

- métaux ;
- matières en suspension ;
- chlorures, fluorures et sulfates.

Les écoulements d'eaux usées sont de natures différentes :

- eaux usées des épurateurs par voie humide ;
- eaux usées des filtres électrostatiques humides ;
- eaux usées de l'étape d'élimination du mercure ;
- eaux usées du cassage des batteries et de la classification de leurs constituants ;
- eaux usées de la granulation du laitier ;
- eaux usées des différents procédés hydro-métallurgiques ;
- effluents liquides du lavage des anodes et des cathodes ;
- eau en circuit fermé des pompes ;
- opérations courantes (nettoyage des équipements, des sols, etc.) ;
- effluents des circuits d'eau de refroidissement ;
- ruissellement des eaux de pluie provenant des surfaces (zones de stockage, notamment) et des toitures.

Les eaux usées provenant de l'épuration des gaz du four de fusion et des étapes de grillage par lit fluidisé sont les principales sources de rejets dans l'eau. Viennent s'ajouter les effluents de procédé provenant de l'électrolyse, du cassage des batteries et de l'épuration, ainsi que d'autres sources diverses.

5.2.3.1 Eaux usées provenant de l'installation de dépollution

Les systèmes d'épuration du gaz par voie humide fonctionnent généralement par recyclage de liquide. Un dispositif de purge commandé permet de maintenir les matières solides en suspension et les sels dissous en deçà de certaines limites définies. Le liquide de purge est traité soit séparément, soit dans une unité intégrée de traitement de l'eau afin d'éliminer les solides et les sels dissous avant d'être rejeté. La destination de la substance séparée dépend de l'origine des eaux usées.

Les laveurs humides utilisés à l'issue du procédé de grillage fonctionnent avec une solution acide saturée de SO₂. Le laveur élimine les fluorures, les chlorures, la majeure partie du mercure et du sélénium et les rares particules qui subsistent après le traitement mécanique des gaz. Afin d'éviter toute accumulation de polluants, une petite quantité de liquide doit être purgée en continu du laveur. Le SO₂ dissous est éliminé au cours du traitement qui précède le rejet.

Les filtres électrostatiques par voie humide produisent également un liquide d'épuration acide. Celui-ci est filtré puis recyclé. Le circuit doit être purgé d'une partie de ce liquide afin d'évacuer le dépôt de polluants. La solution obtenue après la purge est traitée et analysée avant d'être rejetée [tm 101, Personal Discussions 1998].

L'étape d'élimination du mercure est réalisée au moyen d'un bassin de mélange gaz-liquide dans lequel le liquide contient un réactif qui se lie au mercure et facilite son élimination. On utilise souvent du chlorure de mercure (HgCl_2) qui réagit avec le mercure métal présent dans le gaz pour former un précipité solide de Hg_2Cl_2 (également appelé calomel). Le liquide relativement propre est évacué comme eau usée en vue d'un traitement supplémentaire. Le Hg_2Cl_2 solide est vendu à des usines de récupération du mercure ou traité afin de produire de nouveau du chlorure de mercure. Le tableau suivant indique la composition des liquides non-traités provenant de l'épuration des gaz.

Composé	Concentration (dissous)	Composition des particules en suspension
Matières solides		250 – 1 500 mg/l
Sulfate	13 – 25 g/l	
Chlorure	1,3 – 1,8 g/l	
Fluorure	0,3 – 0,5 g/l	
Mercure	0,1 – 9 mg/l	5 – 30 % des particules en suspension
Sélénium	0,1 – 50 mg/l	10 – 60 % des particules en suspension
Arsenic	5 – 95 mg/l	< 0,05 % des particules en suspension
Zinc	0,1 – 2,5 g/l	2 – 6 % des particules en suspension
Cadmium	1 – 95 mg/l	
Plomb	1 – 13 mg/l	5 – 50 % des particules en suspension

Tableau 5.20 : Effluents classiques de l'étape d'épuration des gaz

5.2.3.2 Récupération des batteries

Le cassage des batteries et les étapes de lavage produisent un effluent acide qui contient du plomb et d'autres métaux en suspension et en solution. Cet effluent est neutralisé et l'eau est recyclée dans le procédé. L'acide est, dans la mesure du possible, utilisé pour une autre application. Une partie de l'effluent est généralement purgée du système afin de contrôler les sels dissous.

Ces traitements produisent également de l'eau de surface polluée, qui subit donc elle aussi un traitement avant d'être réutilisée. Le rejet du liquide purgé à partir de ce circuit d'eau fermé après traitement supplémentaire et analyse est une pratique courante. La pollution des routes et des surfaces est minimisée par un nettoyage humide fréquent des routes, des zones de terrain ferme et des poids-lourds, ainsi que par le respect des pratiques de nettoyage des produits déversés.

La qualité et la quantité des eaux usées varient en fonction des procédés utilisés, de la composition des matières premières utilisées dans le procédé et des pratiques mises en œuvre par les techniciens. La réutilisation des eaux de procédé et des eaux de pluie est largement pratiquée.

5.2.3.3 Effluents de purge d'électrolyte

L'électrolyte peut être purgé des cellules pour réguler les dépôts d'impuretés (magnésium, par ex.) qui pourraient nuire au fonctionnement des cellules électrolytiques. Dans le cas de la production de zinc, les liquides qui s'écoulent à l'intérieur des cellules font partie du même circuit d'eau (fermé) que celui des étapes de lixiviation et de purification. L'acide sulfurique formé durant l'électrolyse est dirigé vers le

procédé de lixiviation et le liquide restant est purifié puis alimente l'électrolyse [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999].

Les effluents purgés du circuit d'électrolyse-lixiviation-purification présentent une teneur élevée en acide et contiennent de fortes concentrations de zinc et de particules en suspension. Le volume de la purge dépend largement de la composition des concentrés de zinc utilisés lors du grillage. Les composés qui ont tendance à s'accumuler dans le circuit (magnésium, notamment) déterminent le débit de purge et le traitement nécessaire.

5.2.3.4 Sources diverses

Les électrodes utilisées pour l'électrolyse doivent être rincées régulièrement afin d'éliminer les substances déposées sur leur surface. Du dioxyde de manganèse se forme sur la surface des anodes par réaction de l'oxygène avec le manganèse dissous. Après rinçage des anodes, le manganèse est séparé de l'eau de rinçage pour être réutilisé dans un autre circuit.

	Effluent	Débit	Principaux constituants [mg/l]					
Procédé	[m ³ /a]	[m ³ /h]	Pb	Cd	As	Zn	Ni	DCO
Électrolyse		40 - 200	0,01 – 0,5	0,001 – 0,3		0,01 – 6,0		
Procédé ISF		380 - 420	0,05 – 0,5	0,005 – 0,035	0,005 – 0,1	0,05 – 1,0		
Four Waelz et unité de lixiviation de l'oxyde	150 000	25	< 0,2	< 0,15	< 0,5	< 3,0	< 2,0	
Four Waelz	60 000	9 – 10	0,3 – 0,5	0,05 – 0,2		0,8 – 1,0		
CX + four rotatif	190 000	12,7	0,12 – 1,4	0,06 – 0,09	0,05 – 0,5	0,14 – 1,6	0,1 – 0,7	13 - 225
MA + four rotatif	124 000		0,02	0,07	< 0,0005	0,27	0,09	
Batteries entières	150 000	40	0,4	0,01	< 0,001	0,01	< 0,05	96
Four à cuve	17 000		< 0,2	< 0,1		< 0,3		
QSL	90 000	10	0,1	< 0,05	< 0,05	0,3	< 0,05	20
CX + four rotatif + affinage du Pb	46 800		0,3	0,03	0,037			83
Ausmelt	110 000	13	0,01 – 0,09	0,001 – 0,01	0,001 – 0,1	0,01 – 0,2		50 - 200

Tableau 5.21 : Analyse de la composition classique des eaux usées

Les cathodes sont nettoyées après élimination des films de zinc ou de plomb. Les effluents liquides provenant du lavage des anodes et des cathodes sont acides et susceptibles de contenir du cuivre, du zinc, du plomb et des particules solides en suspension [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU 1999].

Unité de procédé	Fonctionnement / source	Options d'utilisation ou de traitement
Générale	Eaux de pluie provenant des routes, des parcs de stockage et des toitures Nettoyage humide des routes Nettoyage des poids-lourds,...	Unité de traitement des eaux usées / réutilisation Unité de traitement des eaux usées Recirculation, unité de traitement des eaux usées
Séparation des éléments de batteries	Liquides déversés	Utilisation dans le procédé de désulfuration / unité de traitement des eaux usées
Désulfuration de la pâte	Liquides déversés	Utilisation dans le procédé de désulfuration / unité de traitement des eaux usées
Opération de fusion et de fonte	Eau de refroidissement des fours, des machines et des équipements	Recirculation
Granulation du laitier	Effluents des filtres électrostatiques par voie humide Eau de granulation	Recirculation, unité de traitement des eaux usées Recirculation
Système d'épuration du gaz	Condensat du système de refroidissement des gaz, filtres électrostatiques par voie humide Condensat de l'élimination du mercure Fuites	Élimination des poussières en suspension et réutilisation comme charge, unité de traitement des eaux usées Envoyé vers l'unité de traitement des eaux usées après élimination du mercure Recirculation
Unité d'acide sulfurique	Équipement de refroidissement à l'eau Fuites	Recirculation Unité de traitement des eaux usées
Unité de fabrication de cadmium	Solution après élimination du cadmium Fuites	Unité de traitement des eaux usées Unité d'élimination du cadmium ou de traitement des eaux usées
Stockage des charges	Eaux de surface (pluies/humidité)	Unité de traitement des eaux usées
Unité de frittage	Épurateur (refroidissement des fines de frittage)	Unité de traitement des eaux usées
Épuration des gaz de grillage	Épuration des gaz par voie humide	Unité de traitement des eaux usées
Lixiviation du cadmium	Lixiviation du cadmium	Unité de traitement des eaux usées
Four IS	Épuration des gaz Épuration des gaz de la chambre de chauffage au coke	Unité de traitement des eaux usées ; recirculation Recirculation
Granulation du laitier	Eau usée venant de la granulation	Recirculation, unité de traitement des eaux usées
Grillage / épuration des gaz de grillage	Épuration par voie humide des gaz de grillage	Unité de traitement des eaux usées
Lixiviation	Opérations générales (épuration des gaz par voie humide, notamment)	Retour au processus de lixiviation
Purification	Opérations générales	Retour au processus de lixiviation
Électrolyse	Nettoyage des cellules, des anodes et des cathodes	Retour au processus de lixiviation
Toutes unités de process	Maintenance	Unité de traitement des eaux usées
Unité de traitement des eaux usées	Traitement des effluents	Réutilisation en vue de certaines applications / rejet

Tableau 5.22 : Tableau récapitulatif des sources d'eaux usées potentielles et des options disponibles

L'eau de refroidissement provenant de la granulation du laitier est généralement réinjectée dans un système en circuit fermé.

5.2.4 Résidus et déchets issus des procédés

La production des métaux s'accompagne d'une formation de plusieurs sous-produits, résidus et déchets, qui sont également recensés dans le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil 94/3/CE). Les principaux résidus spécifiques aux procédés sont énumérés ci-dessous.

Les résidus solides provenant de différents procédés et étapes de dépollution peuvent avoir l'une des trois destinations suivantes :

- recyclage dans le procédé ou en amont du procédé ;
- traitement en aval destiné à récupérer d'autres métaux ;
- mise en décharge finale, au besoin après un traitement permettant d'assurer la sécurité de la mise en décharge.

Voici les principaux modes de formation de déchets solides :

La production de zinc par procédé électrolytique est l'une des sources majeures de déchets solides de l'industrie des métaux non-ferreux. La lixiviation génère des quantités relativement importantes de déchets solides à base de fer. La jarosite et la goethite sont classées comme déchets dangereux du fait de leur teneur en éléments lixiviables tels que le cadmium, le plomb et l'arsenic. Les procédés de lixiviation et de purification, ainsi que l'électrolyse du zinc et les étapes d'affinage du plomb sont également générateurs d'autres solides riches en métaux. Ces résidus présentent généralement une teneur élevée en un métal donné et sont réutilisés dans les procédés de fabrication correspondants.

Les fours IS ou les fours de fusion directe sont également d'importantes sources de laitiers solides. Ceux-ci ont été exposés à de hautes températures et présentent généralement de faibles teneurs en métaux lixiviables ; ils sont donc utilisables comme matériaux de construction.

Le traitement des effluents liquides entraîne également la formation de résidus solides. Les principaux flux de déchets sont le gypse (CaSO_4) et les hydroxydes de métaux produits dans l'unité de neutralisation des eaux usées. Ces déchets, considérés comme un effet croisé des procédés de transformation, mais nombreux sont ceux qui sont recyclés vers des procédés pyrométallurgiques permettant de récupérer les métaux.

Les poussières ou les boues provenant du traitement des gaz servent de matières premières pour la production d'autres métaux tels que le germanium, le gallium, l'indium ou l'arsenic, etc., et peuvent être renvoyées dans le four de fusion ou dans le circuit de lixiviation afin de récupérer le zinc et le plomb.

Des résidus de mercure et de sélénium sont formés lors du prétraitement des flux de mercure ou de sélénium issus de l'étape d'épuration des gaz. Ce flux de déchets solides représente environ 40 à 120 t/a pour une installation classique. En fonction de l'offre et de la demande pour ces métaux, le mercure et le sélénium peuvent être récupérés à partir de ces résidus.

5.2.4.1 Résidus de lixiviation

La production de solides à base de fer (goethite, jarosite ou hématite) représente la majeure partie du volume de déchets, en fonction du procédé utilisé. Le tableau suivant présente la composition de ces résidus [tm 101, NL Zn 1998].

Procédé	Fe %	Zn %	Pb %	Cu %	Cd %
Hématite (avec lixiviation directe intégrée)	65 - 67	< 0,2	< 0,01	< 0,02	< 0,01
Hématite (sans lixiviation directe)	59	1	0,01	0,02	0,02
Gœthite	40 - 42	5 - 9	< 2	< 0,3	< 0,1
Para-gœthite	40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Jarosite classique	20 - 30	2 - 6	0,2 - 6	< 0,2	0,05 - 0,2
Jarosite peu contaminée	32	0,3	0,1	0,2	0,001
Jarosite aurifère	26	1	4	0,08	0,05

n.d. = non disponible

Tableau 5.23 : Exemples de composition de différents types de résidus
[tm 101, NL Zn 1998 ; tm 120, TU Aachen 1999]

Ces résidus représentent généralement :

- jarosite : de 0,35 à 0,80 tonne par tonne de zinc produite ;
- gœthite : de 0,3 à 0,35 tonne par tonne de zinc produite ;
- hématite : 0,2 tonne par tonne de zinc produite.

Le procédé de l'hématite n'est, à l'heure actuelle, pas assez compétitif en termes économiques car il est largement plus complexe et coûteux à mettre en œuvre. En outre, l'hématite ne constitue toujours pas une matière première acceptable pour d'autres secteurs.

Après filtration et lavage, les boues contiennent encore certains métaux lixiviables. Les résidus peuvent être neutralisés et traités au sulfure, ce qui les rendra moins lixiviables. La mise en décharge de ces résidus peut induire des coûts considérables puisque le confinement de ces substances nécessite des bassins spéciaux à revêtement interne ou des zones de stockage isolées. Ces bassins doivent faire l'objet d'une surveillance étroite afin d'éviter les fuites et nécessitent un suivi constant de la qualité des nappes phréatiques [tm 101, NL Zn 1998 ; tm 102, DFIU Zn 1999]. L'effet croisé est donc important, par rapport aux procédés qui permettent de produire des résidus inertes.

Comme cela a été indiqué dans la section 5.1.5.2, les résidus de lixiviation peuvent être traités dans un four IS ou Waelz.

En Corée, ces résidus subissent également un procédé pyrométallurgique permettant d'obtenir un laitier non-lixiviable et des oxydes métalliques récupérables [tm 41 & 43, Ausmelt 1997]. Des problèmes d'accumulation de polluants ont été observés [Zn Expert response to 1st Draft, 1998]. La section intitulée « Techniques émergentes » donne un aperçu des autres développements actuels.

5.2.4.2 Laitiers et résidus pyrométallurgiques

Les laitiers produits par les procédés du haut fourneau, ISF, de fusion directe et à four Waelz présentent généralement de très faibles concentrations de métaux lixiviables. Ils sont donc souvent utilisables comme matériaux de construction [tm 102, DFIU Zn 1999]. Selon les matières premières utilisées, le volume de laitier produit représente environ 10 à 70 % du poids de métal produit.

Les laitiers provenant des unités de récupération des batteries représentent 13 à 25 % du poids de plomb produit. En fonction de la lixivibilité des métaux qu'ils contiennent, ces laitiers peuvent ou non être utilisés comme matériaux de construction. Cette lixivibilité dépend des fondants utilisés et des conditions opératoires [tm 102, DFIU Zn 1999]. L'utilisation de fondants à base de sodium (Na_2CO_3) permettant de fixer le soufre dans le laitier augmente la quantité de métaux lixiviables. Ces laitiers et scories provenant

des procédés de récupération des batteries contiennent parfois de l'antimoine. Celui-ci est normalement récupéré, mais le stockage en conditions humides peut induire une émission de stibine.

Les Etats membres disposent d'une série de tests de lixivibilité standard spécifiques à chaque pays.

Constituant	Éluat (selon la norme DEVS4) [mg/l]
Zn	0,02 – 0,1
Pb	0,005 – 0,1
As	0,001 – 0,02
Fe	0,05 – 0,2
Cu	< 0,001 – 0,05
pH	7 – 11

Tableau 5.24 : Valeurs de l'éluat du laitier granulé provenant du four IS
[tm 102, DFIU Zn 1999]

	Éluat (selon la norme DEVS4)
Constituant	Laitier provenant du four Waelz [mg/l]
Zn	0,05
Pb	0,02
As	0,008
Cr _{tot}	0,002
Ni	0,005
Fe	0,5
Cu	0,05
F	1
Cl	5
pH	9,9

Tableau 5.25 : Valeurs de l'éluat du laitier acide provenant du four Waelz
[tm 102, DFIU Zn 1999]

Constituant	Éluat (selon la norme DEVS4) [mg/l]
As	0,05
Cd	0,001
Cu	0,005
Pb	0,02 – 0,2
FeO	< 0,05

Tableau 5.26 : Valeurs de l'éluat du laitier obtenu par procédé QSL [tm 102, DFIU Zn 1999]

Étape d'affinage	Résidus solides produits	Options d'utilisation ou de traitement
Démattage / décuivrage	Scories de cuivre	Procédé supplémentaire pour récupérer le cuivre et le plomb
Adoucissement (procédé Harris / adoucissement à l'oxygène)	Laitiers de Harris Laitier riche en antimoine	Procédé hydrométallurgique pour récupérer le métal Procédé pyrométallurgique pour récupérer le métal
Désargentation	Croûte zinc-argent	Récupération des métaux nobles
Dézincification	Zinc métal	Réutilisation dans le processus de désargentation
Débismuthage	Croûte de bismuth	Récupération du bismuth
Élimination des métaux alcalins et alcalinoterreux	Scories d'oxyde de magnésium et d'oxyde de calcium	Recyclage interne sous forme de fondant
Finition	Scories caustiques	Recyclage interne

Tableau 5.27 : Matières solides obtenues à l'issue de l'affinage du plomb d'œuvre

Les scories et les matières solides, éliminées lors des étapes de fusion et d'affinage du zinc et du plomb, contiennent des métaux qui peuvent être récupérés.

5.2.4.3 Autres matériaux

L'unité de traitement des batteries produit également du polypropylène provenant des boîtiers broyés. La teneur totale en plastique représente de 11 à 20 % du poids de plomb produit [tm 102, DFIU Zn 1999]. Il existe un certain nombre d'usines de fabrication des plastiques spécifiquement conçues pour ce matériau, qui produisent des grains de polypropylène destinés à l'industrie automobile. Il est essentiel de procéder à un lavage soigneux de la fraction de polypropylène et de la séparer des autres constituants plastiques tels que l'ébonite ou le PVC pour pouvoir produire des produits conformes aux spécifications.

Les tableaux suivants présentent les possibilités d'utilisation ou de traitement des résidus issus de différents procédés.

Étape de production	Produit ou résidu	Quantité [kg/t Zn]	Options d'utilisation ou de traitement
<i>Lixiviation / électrolyse</i>			
Four de grillage / unité d'acide sulfurique	Acide sulfurique Vapeur Produit à base de Hg Boues acides	1 750 2 000 0,3 – 0,8 < 0,5	Vendu Convertie en énergie Vendu Mise en décharge contrôlée ou réintroduites dans le four de grillage
Unité de lixiviation	Résidu de lixiviation neutre Gœthite ou jarosite Concentré Pb-Ag Résidu final (si les concentrés de Pb/Ag sont retirés)	500 – 600 300 – 650 40 – 120 150	Envoyé vers l'ISF, le four Waelz ou le procédé de lixiviation acide à chaud Mise en décharge contrôlée Récupération de l'Ag Mise en décharge contrôlée
Purification	Cadmium Cuivre cémenté	2 - 4 Jusqu'à 10	Vendu Vendu
Traitement des eaux usées	Précipitation - boues	10 *	Mises en décharge ou envoyées vers le four de fusion du Pb / Zn
<i>ISF</i>			
Unité de frittage / unité d'acide sulfurique	Boues acides Produit à base de Hg Poussières volantes Acide sulfurique	0,25 0,15 200 1 300	Mise en décharge contrôlée Vendu ou mise en décharge contrôlée, selon la composition Envoyées vers l'unité de Cd Vendu
Unité de cadmium	Carbonate de cadmium Sulfure de thallium Résidus de lixiviation	18 0,25 180	Vendu Mise en décharge contrôlée Envoyés vers l'unité de frittage
Four Imperial Smelting	Laitier provenant de l'ISF	600 - 900	Vendu ou mise en décharge contrôlée **
Traitement des eaux usées	Boues précipitées	30	Recyclées dans l'unité de frittage
<i>Distillation New Jersey</i>			
Liquation	Plomb Zinc durci	15 *** 25 – 50 ***	Vers l'affinage de Pb ou vers l'ISF Retour à l'ISF
Élimination de l'arsenic	Scories	< 1 - 5 *	Retour à l'ISF
Traitement des effluents gazeux	Poussières volantes	10	Retour à l'unité de frittage
Note : * estimation **selon la qualité et les réglementations applicables *** la quantité peut varier en fonction de l'alimentation du procédé.			

Tableau 5.28 : Résidus provenant des procédés de production du zinc [tm 120, TU Aachen 1999]

Étape de production	Produit ou résidu	Quantité [kg/t Pb]	Options d'utilisation ou de traitement
<i>Unité de vaporisation du laitier</i>			
Vaporisation du laitier	Laitier	700	Matériau de construction hydrofuge
	Matte	2,5 – 25	Envoyée vers le four de fusion du Cu
	Vapeur	2 500	Convertie en énergie
<i>Traitement des batteries – four rotatif court</i>			
Traitement physique des batteries	Na ₂ SO ₄ (CX)	140	Vendu
	Pâte de batterie (MA)	500	Retour au four de fusion primaire
	Polypropylène	70 – 80	Vendu
Fusion	Plastiques résiduels	100 - 130	Éliminés ou incinérés
	Laitier	150 – 200	Mise en décharge
	Poussières des effluents gazeux	25 - 60	Retour au four de fusion du Pb après traitement
Affinage	Scories	60 - 90	Envoyées vers le four de fusion primaire
Traitement des eaux usées	Boues précipitées		Retour au four de fusion
<i>Traitement des batteries – haut fourneau</i>			
Préparation de la charge	Acide usagé	100	Utilisation externe ou neutralisation
Four à cuve	Matte FePb	< 150	Vendue aux unités de fusion de PbCu
	Laitier	50	Construction de routes
	Poussières de l'effluent gazeux	500 < 50	Laitier recyclé Recyclage interne / externe
Affinage	Scories	80	Vendues pour récupérer le métal
<i>Four à cuve pour le Pb primaire</i>			
Machine de frittage	Poussières de l'effluent gazeux	Jusqu'à 100	Retour à la machine de frittage après lixiviation du Cd
	Aggloméré récupéré	Jusqu'à 3 000	Retour à la machine de frittage
	Acide sulfurique	600	Vendu
	Calomel		Vendu ou mise en décharge contrôlée
Unité d'acide sulfurique	Boues acides		
Unité de cadmium	Précipité CdZn		Vendu
Four à cuve	Laitier	500 + 600	Retour à la machine de frittage
	Poussières de l'effluent gazeux	(retour) Jusqu'à 80	
Traitement des eaux usées	Boues	3	Retour partiel à la machine de frittage

Tableau 5.29 : Résidus provenant des procédés de production du plomb
[tm 120, TU Aachen 1999]

Étape de production	Produit ou résidu	Quantité [kg/t Pb]	Options d'utilisation ou de traitement
<i>Procédé Kivcet</i>			
Four de fusion	Laitier Poussières I Poussières II Vapeur	700 110 100 1 300	Mise en décharge contrôlée Renvoyées dans le four de fusion Utilisées dans la lixiviation du zinc Convertie en énergie
Unité d'acide sulfurique	Acide sulfurique Chlorure mercureux Boues acides	1 100 < 0,10 0,5	Vendu Vendu Mise en décharge contrôlée
Traitement des eaux usées	Boues		
<i>Procédé Kaldo</i>			
CRSH - TBRC (Kaldo)	Laitier Poussières Vapeur	350 160 700	vers la vaporisation Renvoyées dans le four de fusion Convertie en énergie
Unité d'acide sulfurique	Acide sulfurique calomel Boues acides	500	Vendu
Traitement des eaux usées	Boues		
<i>Procédé QSL</i>			
Four de fusion	Laitier Poussières Vapeur	440 60 1 300	Construction de routes Renvoyées dans le four de fusion après lixiviation du Cd Convertie en énergie
Unité d'acide sulfurique	Acide sulfurique caolmel Boues acides	720 0,02 – 0,05 0,5	Vendu Vendu Renvoyées dans le four de fusion
Unité de cadmium	Précipité CdZn	1,1	Vendu
Traitement des eaux usées	Boues		Renvoyées dans le four de fusion
<i>Four ISA Smelt / Ausmelt</i>			
Four de fusion	Laitier primaire Laitier final Poussières Scories Poussières de ZnO Vapeur	600 275 250 125 50	Renvoyé dans le four de fusion* Renvoyées dans le four de fusion ou l'unité de lixiviation Renvoyées dans le four de fusion* Envoyées vers le four de fusion du zinc Convertie en énergie
Unité d'acide sulfurique	Acide sulfurique Boues acides Précipité de Hg	350 < 1 0,2	Vendu Renvoyées dans le four de fusion Production de caolmel
Lixiviation des poussières	Précipité CdZn Résidus de plomb	1,1 40	Envoyé vers le four de fusion du zinc Renvoyés dans le four de fusion
Traitement des eaux usées	Boues	< 5	Renvoyées dans le four de fusion
Note : Campagnes spéciales dont l'objectif est de réduire le laitier.			

Tableau 5.30 : Résidus provenant des procédés de fusion directe du plomb [tm 120, TU Aachen 1999]

5.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et de les procédés associés.

Le contrôle des paramètres de fonctionnement des fours, la prévention des émissions fugitives provenant des fours et les procédés de vidange et de coulée en poche jouent également un rôle majeur. Certaines techniques utilisées dans d'autres secteurs, notamment celles relatives aux systèmes de récupération du soufre, sont également applicables aux métaux non-ferreux.

Pour chaque site de production, les techniques à prendre en compte dépendent largement des matières premières disponibles ; ainsi le type et la stabilité du concentré ou des matières premières secondaires en particulier, de même que les métaux qu'il / elles contiennent, peuvent avoir une influence décisive sur le choix du procédé à employer. Si certains de ces procédés dépendent d'une seule source dédiée de matière première, la plupart des installations européennes se procurent néanmoins les concentrés sur le marché et doivent garantir une certaine flexibilité en traitant un panel de matières premières diversifié. De même, les méthodes standard de collecte et de dépollution des émissions utilisées dans le monde entier reflètent les normes de qualité environnementale applicables au niveau local, régional et transfrontalier ; il est donc difficile d'établir une comparaison directe des performances environnementales des différentes combinaisons de procédés. Il est toutefois possible d'évaluer les performances d'un procédé donné utilisant les équipements de dépollution modernes appropriés.

Les procédés décrits ci-dessus s'appliquent à un large panel de matières premières dont les quantités et la composition varient ; ils sont donc également représentatifs des procédés utilisés dans le reste du monde. Les techniques ont été mises au point par les entreprises du secteur afin de tenir compte de ces variations. Le choix entre un procédé pyrométallurgique et un procédé hydrométallurgique dépend des matières premières utilisées, de leur quantité, des impuretés qu'elles contiennent, des produits fabriqués et du coût des opérations de recyclage et de purification [tm 120 TU Aachen 1999]. Ces facteurs sont donc spécifiques à chaque site. Les procédés de récupération de base présentés ci-dessus sont donc les techniques à envisager pour les procédés de récupération, dès lors que les étapes de dépollution nécessaires sont effectuées. Les techniques à prendre en compte pour les étapes de collecte et de dépollution, ainsi que d'autres aspects de la mise en œuvre et de la régulation des procédés, sont traités dans les sections 2.6, 2.7 et 2.8.

5.3.1 Stockage, manutention et prétraitement des matériaux

Les matières premières utilisées sont des concentrés, des matières premières secondaires, des fondants et des combustibles ; les autres matériaux importants sont les produits, l'acide sulfurique, les laitiers, les boues et les résidus de traitement. Les principaux aspects à prendre en compte sont la prévention des fuites de poussières et de matières humides, la collecte et le traitement des poussières et des liquides, et le contrôle des paramètres d'entrée et de fonctionnement des procédés de manutention et d'alimentation des matières. Les difficultés inhérentes à ce groupe sont les suivantes :

La nature potentiellement pulvérulente des concentrés et des fondants signifie qu'il peut alors être nécessaire que le stockage, la manutention et les procédés de traitement s'effectuent en enceinte fermée. Du fait des poussières générées par certaines opérations de concassage, il faut parfois assurer la mise en place de dispositifs de collecte et de traitement pour ces procédés. De même, l'eau de granulation peut nécessiter une décantation ou un autre traitement avant rejet.

Les concentrés sont mélangés avec les fondants pour obtenir une charge suffisamment constante ; la pratique courante est donc de procéder à un prélèvement et à une analyse des concentrés permettant de déterminer leurs propriétés, et de les stocker séparément de façon à pouvoir préparer un mélange d'une qualité optimale pour la fusion.

Les mélanges de la charge peuvent être préparés à l'aide de systèmes de bennes de dosage comportant des bascules à bandes ou au moyen de dispositifs de perte en poids. Le mélange et l'homogénéisation finaux s'effectuent dans des mélangeurs, des granulateurs, ou à l'intérieur des systèmes de transport et de dosage. Les matériaux pulvérulents nécessitent l'utilisation de systèmes de convoyeurs fermés ou de dispositifs de manutention pneumatique. Il est possible d'utiliser des fours de séchage rotatifs sur gaz chauds ou des fours de séchage à serpentin de vapeur si le procédé requiert une alimentation sèche ; les fours de séchage à serpentin de vapeur utilisent la chaleur résiduelle émise lors d'autres opérations dès lors que l'équilibre thermique le permet. L'étape de séchage et le procédé associé de dépoussiérage dépendent donc des conditions spécifiques au site (fiabilité de l'approvisionnement en vapeur, par ex.). Utilisés à ce stade du procédé, les filtres à manches ou les filtres céramiques permettent d'obtenir un meilleur rendement de dépoussiérage que les filtres électrostatiques.

L'acide produit au cours du traitement peut être stocké dans des réservoirs à double paroi ou dans des cuves placées dans des enceintes résistant aux agents chimiques. Le traitement des boues acides issues de l'unité d'acide sulfurique et de l'acide faible provenant des systèmes d'épuration dépend des exigences locales relatives au traitement et à l'élimination, à moins qu'il n'existe au niveau local un débouché pour ces substances.

Les boues et autres résidus métalliques qui sont destinés à une filière de récupération hors site peuvent être stockés dans des fûts ou dans d'autres récipients adaptés, selon le cas. Les boues produites lors du procédé et destinées à être mises en décharge sur site doivent, dans la mesure du possible, subir un lavage permettant d'éliminer le zinc et les autres métaux qu'elles contiennent ainsi qu'une déshydratation. Les sites d'enfouissement doivent être entièrement confinés et étanches ; ils font l'objet d'un contrôle et de réglementations au niveau local. L'eau des zones de confinement des boues peut être recyclée dans le procédé.

Il existe une variété de matières premières secondaires allant des poussières fines aux éléments de dimensions supérieures. La teneur en métal principal varie en fonction des matériaux, de même que la teneur en autres métaux et en contaminants. Les batteries constituent une source courante de plomb et peuvent en outre contenir de l'acide ; leur stockage et leur manutention nécessitent donc de tenir compte de la teneur en acide et de la formation éventuelle de brouillards acides. Les batteries Ni/Cd sont généralement sèches, mais les autres types de batteries peuvent être présentes et une fuite d'électrolyte est possible : la méthode de stockage et de séparation retenue doit elle aussi tenir compte de ce risque. Les techniques de stockage, de manutention et de prétraitement dépendent donc de la taille du matériau et de l'étendue de la contamination, le cas échéant. Ces facteurs varient d'un site à l'autre, et les techniques présentées dans la section 2.4 sont donc applicables à un site et à un matériau spécifiques. Les métaux de ce groupe nécessitent la prise en compte des points suivants :

- Le stockage des matières premières dépend de la nature des matériaux décrits ci-dessus. On utilise le stockage des poussières fines en bâtiments clos ou en conditionnement hermétique. Les matières premières secondaires qui contiennent des composés hydrosolubles sont stockées sous abri. Le stockage des matériaux non-pulvérulents et non-solubles (à l'exception des batteries) peut s'effectuer sur des tas à ciel ouvert ; les éléments volumineux peuvent être stockés individuellement à ciel ouvert.

- Les étapes de prétraitement permettent souvent d'obtenir un produit aggloméré ou d'éliminer les boîtiers ou les revêtements et de séparer les métaux. Les techniques de broyage et de meulage s'utilisent avec un système performant d'extraction et de dépollution des poussières. Les poussières fines obtenues peuvent être traitées pour récupérer d'autres métaux ; on a alors recours à des techniques pneumatiques ou autres techniques par séparation par différence de densité.
- Les poussières fines peuvent être stockées et manipulées de façon à éviter toute émission de poussières. Elles sont souvent mélangées et agglomérées pour produire une charge consistante pour le four.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Remarque
<i>Matières premières primaires</i>				
Charbon ou coke	Travées couvertes, silos	Convoyeurs couverts (si matériaux non-pulvérulents) ; manutention pneumatique		
Combustibles	Réservoirs ou fûts avec enceinte	Pipeline sécurisé ou système manuel		
Fondants	En enceinte fermée (silo)	Convoyeurs fermés avec collecte des poussières. ; manutention pneumatique	Mélangés à des concentrés ou à d'autres matériaux	
Concentrés	En enceinte fermée	En enceinte fermée avec collecte des poussières. Convoyeur fermé ou manutention pneumatique	Mélangés à l'aide de convoyeurs ; séchage ou frittage	
<i>Matières premières secondaires</i>				
Poussières fines	En enceinte fermée ou en fût	Convoyeur fermé ou manutention pneumatique		Poussières des fours électriques à arc
Poussières grossières (matière première ou laitier granulé)	Travées couvertes	Chargeuse mécanique		Collecte des huiles si nécessaire
Grosses pièces (matière première ou laitier)	À ciel ouvert	Chargeuse mécanique		Collecte des huiles si nécessaire
Éléments entiers	À ciel ouvert ou dans des travées couvertes	Chargeuse mécanique		Collecte des huiles si nécessaire
Batteries - plomb-acide	Stockage couvert	Chargeuse mécanique et convoyeur	Concassées ou alimentées entières	Collecte de l'acide ; réutilisation possible Séparation du Fe et du Ni
- Ni/Cd	Fûts ou conteneurs hermétiques	Chargeuse mécanique et convoyeur	Élimination des plastiques et pyrolyse	
<i>Produits et résidus</i>				
Acides : - résidu acide - acide produit	Réservoirs résistants aux acides Réservoirs résistants aux acides		Réutilisé dans le procédé ou neutralisé Vendu	
Produits : - cathodes, lingots et gueuses-mères - poussières	Zone bétonnée couverte Fûts ou sacs	Chargeuse mécanique		
Résidus de procédé à récupérer	Couverts ou en enceinte fermée selon le risque de formation de poussières	Dépend des conditions		Système de drainage approprié ; hydrolyse possible de l'antimoine et de l'arsenic
Déchets pour mise en décharge	Travées couvertes, fermées ou hermétiques (fûts) selon la nature du matériau	Dépend des conditions		Système de drainage approprié

Tableau 5.31 : Méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement appliquées au plomb, au zinc et au cadmium

- Le frittage est utilisé pour préparer les concentrés destinés à certains procédés de fusion. On peut utiliser des machines de frittage à aspiration ou soufflage d'air; le développement récent du procédé de frittage à bande d'acier semble prometteur. La collecte des fumées et des gaz joue un rôle important ; de façon inhérente, le procédé de frittage à aspiration d'air facilite le captage des fumées. Les gaz, qui

contiennent du dioxyde de soufre, sont soumis à une dépollution et un procédé de récupération du SO_2 . La teneur en dioxyde de soufre est généralement faible et variable, ce qui influence la conception de l'unité d'acide sulfurique.

- Les concentrés de zinc sont grillés avant de subir un traitement hydrométallurgique. Les fours de grillage à lit fluidisé, utilisés dans presque tous les pays, nécessitent des systèmes performants d'extraction et d'élimination de la calcine. Les gaz sont traités au moyen de procédés intégrés de dépollution et de récupération du dioxyde de soufre.

5.3.2 Procédés de fusion du plomb primaire

Les procédés de fusion du plomb à prendre en compte sont les suivants [tm 120 TU Aachen 1999] :

- Pour les concentrés mixtes de zinc et de plomb après frittage – le four Imperial Smelting comprenant un condenseur à pulvérisation et une colonne de distillation New Jersey permettant de purifier et de séparer le zinc et le cadmium. Les étapes de frittage nécessitent de mettre en place un système de collecte des gaz performant.
- Pour les concentrés de plomb et certaines matières premières secondaires – le haut fourneau et le four électrique après frittage, grillage ou fusion des concentrés. Les techniques de fusion directe utilisant les procédés Kaldor, ISA Smelt/Ausmelt, QSL ou Kivcet.
- Pour les concentrés mixtes de cuivre et de plomb – le four électrique après grillage du concentré dans un four de grillage à lit fluidisé.

Four	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Haut fourneau 110 000 t/a Pb	Semi-hermétique	Bonnes performances métallurgiques	Technique ancienne – nécessite un procédé de régulation moderne.	Dispositif hermétique à deux cloches ou fonctionnement en voûte froide
ISF 100 000 t/a Zn 40 000 t/a Pb	Hermétique	Bonnes performances métallurgiques. Utilisation des gaz à faible pouvoir calorifique.	Technique ancienne – nécessite un procédé de régulation moderne.	Dispositif hermétique à deux cloches dans la trémie d'alimentation
ISA Smelt/Ausmelt 90 000 t/a Pb	Hermétique ou semi-hermétique	Matières premières primaires et secondaires	L'étape de réduction du laitier n'est pas encore mise en œuvre.	Effluents gazeux à teneur élevée en SO_2 . Mélange Cu/Pb.
QSL 90 000 t/a Pb	Hermétique	Matières premières primaires et secondaires. Le procédé est désormais fiable.	Remplacement fréquent des tuyères	Procédé intégré avec récupération de l'énergie. Effluents gazeux à teneur élevée en SO_2 .
Kivcet 90 000 t/a Pb	Hermétique	Matières premières primaires et secondaires. Fiabilité du procédé inconnue.	Laitier à teneur élevée en plomb	Procédé intégré avec récupération de l'énergie. Effluents gazeux à teneur élevée en SO_2 .
Four Kaldor 65 000 t/a Pb	En enceinte fermée	Matières premières primaires et secondaires	Coût élevé	Matériaux comportant un mélange de Cu/Pb.

Tableau 5.32 : Panorama des fours de fusion du plomb primaire

Le système de dépollution à considérer pour les procédés de fusion primaire consiste à éliminer les poussières et les autres métaux puis à récupérer le dioxyde de soufre. Cette dernière étape est généralement effectuée par conversion du SO_2 en acide sulfurique au moyen d'un procédé à double contact comprenant au moins quatre passages et parfois un catalyseur dopé au césium. On peut convertir une partie du SO_2 en SO_2 liquide et convertir le reste en acide sulfurique. L'utilisation d'une unité de

contact à simple absorption ou du procédé WSA est une technique à prendre en compte dans le cas des flux de gaz faiblement concentrés contenant du dioxyde de soufre.

Les gaz sont refroidis (avec récupération de la chaleur / de l'énergie) et épurés avant la conversion. On utilise une combinaison de refroidisseurs et de filtres électrostatiques à chaud, ou une combinaison de laveurs (à disque ou à jet) et de filtres électrostatiques humides. On a recours à des systèmes de récupération du mercure reposant sur les techniques présentées dans la section 2.8.

Il faut également prendre en compte les procédés de frittage à bande d'acier, à aspiration d'air ou à soufflage d'air en enceinte fermée. Le frittage à bande d'acier présente une série d'avantages pour certains groupes de métaux et permet de minimiser le volume des gaz, de réduire les émissions fugitives et de récupérer la chaleur.

5.3.3 Fours de fusion du plomb secondaire

La diversité des matières secondaires et la variabilité de la teneur en métal et du degré de contamination ont induit la nécessité de développer une série de fours de fusion destinés aux matières secondaires. Le haut fourneau, le four ISA Smelt, le TBRC, le four électrique et le four rotatif sont utilisés pour un large panel de matériaux [tm 120 TU Aachen 1999]. Les fours mentionnés ci-dessus sont les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

Plusieurs des techniques décrites dans les sections 2.6, 2.7 et 2.8 sont applicables à l'extraction et à la dépollution des fumées, ainsi qu'aux systèmes de régulation des procédés utilisés par ces fours. A l'heure de la rédaction du présent document, ces techniques ne sont pas encore utilisées systématiquement par toutes les installations. On considère que les systèmes de régulation de procédé adaptés à certains hauts-fourneaux sont appropriés pour être développés.

Les gaz provenant des fours de fusion secondaires contiennent des quantités de dioxyde de soufre qui varient selon la source du matériau. Il peut notamment s'avérer nécessaire de procéder à la désulfuration de la pâte de batterie, à moins que celle-ci ne soit traitée séparément dans un four de fusion primaire ou encore que le soufre puisse être fixé dans une matte de Pb/Fe ou dans le laitier à l'aide d'un fondant à base de sodium ou d'autres fondants à effet similaire. Si le soufre n'est pas fixé, il peut être nécessaire d'utiliser un système d'épuration. Les gaz peuvent contenir des quantités importantes de métaux plus volatils tels que l'antimoine et le cadmium, etc. Les étapes de dépollution qui accompagnent la fusion secondaire comprennent un refroidissement des gaz (avec récupération de la chaleur et/ou de l'énergie), la séparation des particules grossières si nécessaire et le passage dans des filtres à manches. Il faut parfois procéder à l'élimination du dioxyde de soufre et à une post-combustion, en fonction de la composition des gaz émis par les fours (COV et dioxines, par ex.). Les poussières collectées sont recyclées en vue de récupérer les métaux.

En fonction de la matière première utilisée, il se peut que celle-ci présente des concentrations élevées de matières organiques (dioxines, notamment). Ainsi les poussières de fours électriques à arc ont une teneur élevée en dioxines et l'alimentation de batteries entières dans les fours (ou la séparation incomplète de leurs constituants) constituent une source importante de carbone organique et de plastiques chlorés. Dans ce cas, on peut avoir besoin d'utiliser une post-combustion ou une adsorption sur charbon actif et un dépoussiérage hautement efficace.

EXEMPLE 5.01 UTILISATION D'UN DISPOSITIF DE POST-COMBUSTION

Description : Utilisation d'un dispositif de post-combustion, d'un système de refroidissement et d'un filtre à manches pour éliminer les COV, les métaux et les poussières contenus dans les effluents gazeux d'un four. L'exemple proposé concerne une partie d'un système de récupération des batteries au plomb-acide qui utilise comme combustible pour le dispositif de post-combustion les produits de la pyrolyse de la fraction plastique. Le système de dépollution comporte une chambre de post-combustion permettant de détruire les COV.

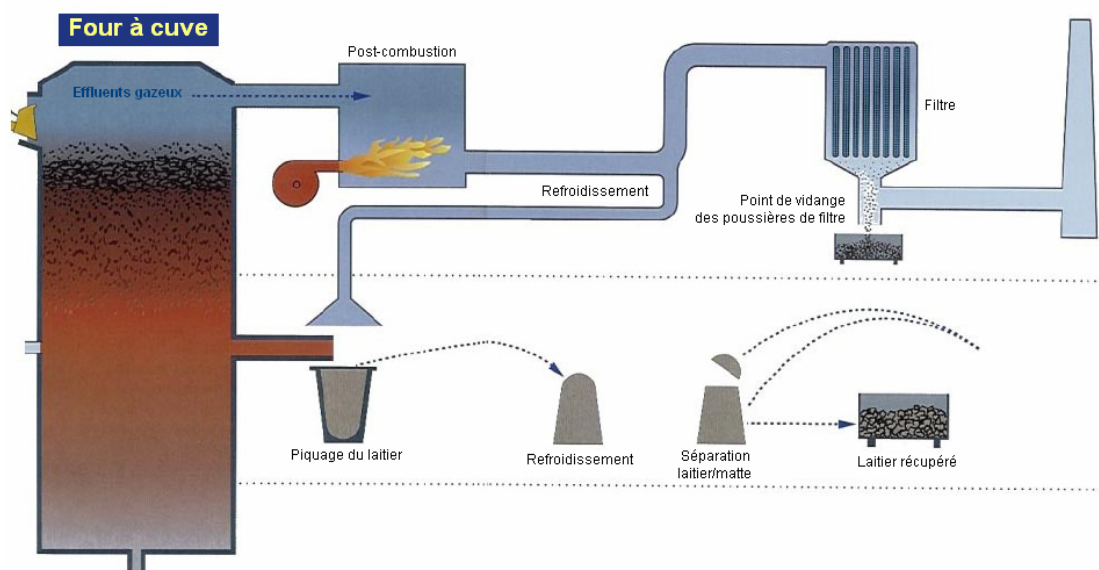


Figure 5.10 : Dispositif de post-combustion utilisé avec un four de fusion de batteries entières

Principaux bénéfices environnementaux : Destruction des COV et récupération de l'énergie des effluents gazeux. L'élimination des poussières et des métaux contenus dans les effluents gazeux permet de recycler les poussières sous filtre dans le four.

Données opérationnelles :

Substance présente dans les effluents gazeux (65 000 m ³ /h)	Teneur
Poussières [mg/Nm ³]	< 1,0
Plomb [mg/Nm ³]	< 0,5
Cadmium [mg/Nm ³]	< 0,05
Carbone _{total} [mg/Nm ³]	< 10
Dioxyde de soufre [mg/Nm ³]	< 500
Oxyde d'azote (NO _x , unité NO ₂) [mg/Nm ³]	< 50
Monoxyde de carbone [mg/Nm ³]	< 50
Chlorure d'hydrogène (HCl) [mg/Nm ³]	< 5
Fluorure d'hydrogène (HF) [mg/Nm ³]	< 0,5
PCDD/PCDF (Σ TE, OTAN) [ng-TE/Nm ³]	< 0,1

Tableau 5.33 : Caractéristiques de performances d'une post-combustion

Les effluents gazeux représentent 65 000 Nm³/h. On effectue un suivi constant des émissions telles que les poussières, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre. On peut injecter dans le canal des effluents gazeux un additif à base d'hydroxyde de calcium afin d'empêcher les pics d'émissions de dioxyde de soufre. La teneur en plomb des poussières du filtre à manches peut atteindre 65 % en poids ; après élimination du chlore, celles-ci peuvent être recyclées comme intrant dans le four de fusion. Pour cela, les poussières sous filtre sont traitées de façon externe par procédé hydrométallurgique pour produire du carbonate de plomb. Celui-ci est renvoyé vers le four à cuve où il est chargé comme matière première.

Effets croisés : Effet positif : réduction des émissions, utilisation de la fraction organique comme combustible. Effet potentiellement négatif du fait de la perte des plastiques et du coût énergétique de leur remplacement.

Aspects économiques : Information non disponible, mais les données relatives à un système de ce type figurent dans les annexes concernant les coûts. A l'heure actuelle, plusieurs usines sont viables sur le plan économique.

Applicabilité : La post-combustion peut être mise en œuvre pour la plupart des fours dont la charge présente une teneur élevée en matières organiques.

Exploitations de référence : Allemagne, Belgique et Suède

Documents de référence : [tm 102, DFIU Zn 1999, tm 120, TU Aachen 1999]

Le tableau suivant donne un panorama des avantages et inconvénients des fours de fusion secondaires utilisés pour différents matériaux.

Four	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Four rotatif	Hermétique durant le fonctionnement. Système de chargement capoté	Procédé performant, bien établi	Panel de matières premières limité. Risque d'émissions fugitives	Zone d'alimentation et de vidange intégrale. Enrichissement en oxygène
ISA Smelt / Ausmelt	Capotage intégral, système de chargement hermétique	Rendement de fusion élevé. Large panel de matières premières	Encore en développement	Enrichissement en oxygène
Haut fourneau	Hermétique via une double cloche ou une porte	Procédé performant. Large panel de matières premières	Les systèmes de régulation du procédé doivent être perfectionnés.	Dispositif de post-combustion pour les matières organiques et les COV
Four électrique	Hermétique	Volume de gaz réduit	Restrictions concernant la charge	Dispositif de post-combustion pour les matières organiques et les COV
TBRC	Système en enceinte fermée	Compact ; rendement de fusion élevé. Le système rotatif assure un taux de réaction élevé.	Coût élevé	Enrichissement en oxygène

Note : Dans tous les cas, les systèmes de dépollution doivent tenir compte des matières premières et de leur prétraitement. En fonction des prétraitements appliqués, on aura recours à différentes combinaisons de post-combustion, d'élimination du dioxyde de soufre, de refroidissement des gaz et d'élimination des poussières (filtre à manches).

Tableau 5.34 : Panorama des fours de fusion secondaires

Les différentes techniques de traitement des batteries ont été comparées afin d'évaluer les principaux types de procédés. Il existe un équilibre entre la récupération du polypropylène des boîtiers et l'utilisation de leur contenu en plastique comme combustible pour le procédé. La remarque la plus évidente est que le contenu énergétique des boîtiers doit être comparé au coût de l'énergie nécessaire à l'élaboration et au moulage des plastiques. On observe néanmoins des effets au niveau local, tels que l'existence d'un débouché pour le PE et les autres plastiques, les possibilités d'utilisation de l'acide et de la chaleur au niveau local et des facteurs à longue distance tels que les effets potentiels du dioxyde de soufre. Ces facteurs doivent faire l'objet d'une évaluation spécifique à chaque site.

L'autre facteur à déterminer au niveau local concerne la désulfuration de la pâte de batterie, la possibilité de fixer le soufre dans une matrice de Pb/Fe ou dans le laitier, et la présence éventuelle, dans une autre unité, d'installations permettant de fondre la pâte de batterie. Il est parfois impossible de procéder, localement, à l'élimination du laitier blanc produit au moyen de fondants à base de soude. D'autres fondants permettent de fixer le soufre dans le laitier et d'éviter les constituants solubles ; mais à l'heure de la rédaction du présent document, aucune information détaillée concernant ces techniques n'est encore disponible.

5.3.4 Traitement du laitier

Les étapes de vaporisation et de réduction du laitier présentées plus haut comme techniques disponibles sont les procédés à considérer lors de la détermination des MTD. La nature spécifique des charges détermine le choix final du procédé. Il faut également tenir compte des techniques présentées dans la section 2.8 qui sont adaptées au procédé.

5.3.5 Affinage du plomb

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD. La teneur spécifique en autres métaux influencera le choix final du procédé. Il faut également tenir compte, en parallèle, des techniques présentées dans le Chapitre 2, notamment celles concernant la régulation thermique des cuves, la collecte des fumées et les systèmes de dépollution. Les cuves d'affinage ne sont pas considérées comme adaptées à la fusion des déchets de plomb contaminés par des matières organiques.

5.3.6 Zinc primaire

Utilisée de manière combinée à l'ISF pour les concentrés mixtes de plomb et de zinc, la colonne de distillation New Jersey est une technique à considérer pour la production pyrométallurgique de zinc primaire.

Four	Collecte des gaz	Avantages	Inconvénients	Commentaires
Extraction électrolytique du zinc 105 000 – 235 000 t/a Zn	Four de grillage hermétique	Performances prouvées	Précipité de fer	
ISF 100 000 t/a Zn 40 000 t/a Pb	Hermétique	Bonnes performances métallurgiques		Utilisation de gaz à faible pouvoir calorifique
Colonne de distillation New Jersey 20 000 – 100 000 t/a Zn	Hermétique	Intégrée à l'ISF pour la production de zinc. Performances prouvées	Problèmes de colmatage	Régulation de procédé et détection des vibrations nécessaires

Tableau 5.35 : Panorama des fours de fusion du zinc primaire

Les procédés hydrométallurgiques jouent un rôle important dans la production de zinc. Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD [tm 120 TU Aachen 1999]. La nature des matériaux entrants détermine le choix final du procédé. Comme cela a été indiqué précédemment, le procédé goëthite utilise une calcine (ou ZnO) à faible teneur en fer pour la précipitation, tandis que le procédé jarosite assure une bonne récupération du zinc même en présence d'une teneur élevée en fer (jusqu'à 10 %) [tm 139, Finland Zn 1999]. Dans les deux cas, il faut effectuer un lavage efficace du précipité de fer. En complément de ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte.

Etant donné que les procédés hydrométallurgiques comprennent des étapes de lixiviation et d'électrolyse, il faut prévoir une élimination adéquate du matériau lixivié et du trop-plein d'électrolyte. Il faut envisager de raccorder les réacteurs et les filtres à des épurateurs ou à des dévésiculeurs adaptés afin d'empêcher toute émission d'aérosols. La section 2.9 présente des techniques appropriées de prévention des rejets dans le milieu aquatique, par exemple le confinement des réseaux d'évacuation est approprié. Dans la mesure du possible, il faut avoir recours aux techniques permettant de rendre inertes les résidus de jarosite ou de goëthite.

5.3.6.1 Affinage chimique

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD. La nature des matériaux entrants détermine le choix final du procédé. En complément de ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte, telles que l'élimination de l'arsine et de la stibine par épuration des gaz émis lors des étapes de traitement chimique au moyen d'un agent oxydant tel que le permanganate de potassium.

5.3.6.2 Extraction électrolytique

Les procédés d'extraction électrolytique qui présentent des dimensions de cellules optimisées (espacement, nombre de cellules, etc.) et utilisent des feuilles de cathodes en aluminium sont des techniques à prendre en compte. Selon l'échelle de l'opération, il peut également être utile d'envisager une collecte et une élimination mécanisées (et automatiques) des revêtements ainsi qu'une détection des courts-circuits plus sophistiquée.

L'extraction électrolytique entraîne une émission de gaz au niveau de l'anode. Ceux-ci formeront un brouillard acide qui doit être collecté et éliminé. Une fois l'extraction et l'élimination des brouillards réalisées, ceux-ci sont renvoyés dans le procédé. L'épuration des gaz collectés ne permet pas de réutiliser les brouillards et contribue à la génération d'eaux usées. Les cellules peuvent être couvertes au moyen de couches de billes faites de matières organiques ou de plastique afin de limiter la formation de brouillards.

EXEMPLE 5.02 COLLECTE ET TRAITEMENT DU BROUILLARD D'ELECTROLYTE

Description : Collecte des gaz de la cellule ou de l'air de ventilation de la halle d'électrolyse de façon à les soumettre à un traitement dévésiculeur.

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination du brouillard acide qui serait, sans cela, rejeté dans l'environnement local. Amélioration des conditions de travail.

Données opérationnelles: Données non disponibles ; une comparaison subjective avec une unité non-modifiée met en évidence une amélioration importante à l'intérieur et à l'extérieur de l'unité.

Effets croisés : Effet positif : récupération de l'acide qui peut être réutilisé dans le procédé. Coût énergétique des ventilateurs.

Aspects économiques : Aucune évaluation n'a été réalisée ; un certain nombre d'installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Tous procédés d'extraction électrolytique.

Exploitations de référence : Espagne.

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

Dans la mesure du possible, il faut procéder au refroidissement de l'électrolyte et récupérer la chaleur. L'air de refroidissement doit également subir un traitement dévésiculeur.

Les procédés et techniques de contrôle, de collecte des brouillards et d'élimination des gaz acides sont applicables aux installations neuves ou existantes.

Parmi les techniques à prendre en compte figurent également les systèmes d'évacuation des halles de cuves d'électrolyse hermétiques et la récupération du trop-plein d'électrolyte.

5.3.7 Zinc secondaire

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD. La nature des matériaux entrants détermine le choix final du procédé. En complément de ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte.

5.3.7.1 Fours Waelz et fours de vaporisation du laitier

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD.

EXEMPLE 5.03 LAVAGE DE L'OXYDE DE WAELEZ

Description : L'oxyde de Waelz peut également être lixivié au moyen d'un procédé en deux étapes utilisant du carbonate de sodium puis de l'eau pour éliminer le chlorure, le fluorure, le sodium, le

potassium et le soufre. Le produit final purifié est séché et peut être utilisé comme matériau entrant dans le procédé électrolytique de production du zinc.

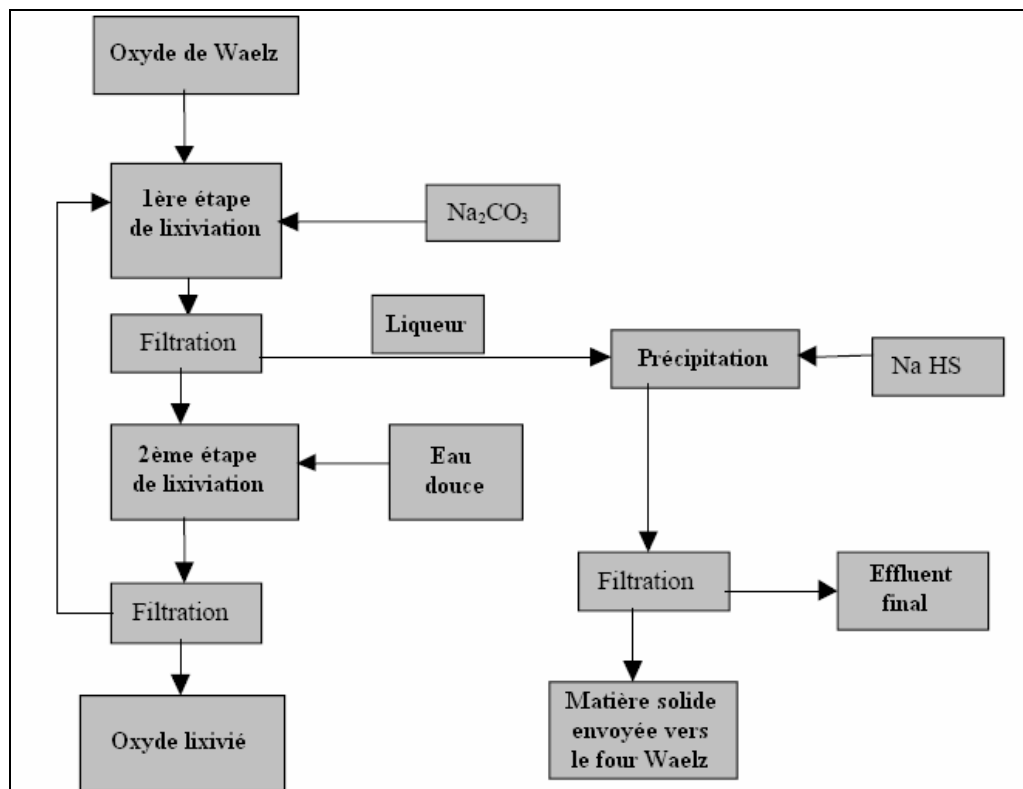


Figure 5.11 : Schéma d'un circuit de lavage de l'oxyde de Waelz

Principaux bénéfices environnementaux : Effet globalement positif – Fixation des impuretés dans le laitier provenant du four ou dans la boue issue du traitement des effluents. Coût énergétique du procédé.

Données opérationnelles :

Constituant	Oxyde de Waelz non-lavé	Oxyde de Waelz lavé
Zn [%]	55 – 60	60 – 68
Pb [%]	7 – 10	8 – 11
S [%]	0,5 – 1	< 0,15
F [%]	0,2 – 0,5	< 0,15
Cl [%]	4 – 8	< 0,15
K ₂ O [%]	1 - 3	< 0,15

Tableau 5.36 : Effet du lavage

Constituant	Eaux usées après traitement au NaHS
Zn [mg/l]	0,1 – 0,2
Pb [mg/l]	0,05 – 0,15
Cd [mg/l]	0,01 – 0,15

Tableau 5.37 : Eaux usées issues du procédé de lavage

Effets croisés : Effet positif : utilisation simplifiée de l'oxyde de Waelz en une étape de lixiviation/électrolyse.

Aspects économiques : Aucune évaluation n'a été réalisée ; actuellement utilisé, le procédé est économiquement viable.

Applicabilité : La plupart des fours Waelz.

Exploitations de référence : Espagne, Allemagne.

Documents de référence : [tm 95, Borja Garcia-Egocheaga 1998]

En complément à ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte, notamment les techniques de prévention de la formation de dioxines ou de destruction des dioxines.

Les procédés et techniques de lixiviation de l'oxyde de Waelz sont applicables aux installations neuves et existantes.

5.3.8 Cadmium et autres métaux

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD. La nature des matériaux entrants détermine le choix final du procédé ; on effectue la séparation du thallium si nécessaire. En complément de ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte. Les procédés d'extraction par solvant utilisés dans la production de Ga, Ge, etc., peuvent également générer des COV et des odeurs.

5.3.9 Collecte et dépollution des fumées/gaz

Les techniques présentées dans les sections 2.7 et 2.8 de ce document pour l'élimination du SO₂, des COV, des dioxines et des poussières sont des techniques à envisager pour les différentes étapes de procédé associées à la production des métaux de ce groupe. L'utilisation éventuelle de hottes secondaires est également une technique à prendre en compte. Le système de capotage doit prendre en compte l'accès pour le chargement et les autres opérations effectuées au niveau du four, et la manière dont les sources de gaz de procédé évoluent au cours d'un cycle de production. L'utilisation d'un dispositif de régulation intelligent peut permettre de cibler automatiquement les émissions de fumées lorsqu'elles se produisent au cours du cycle sans présenter l'inconvénient d'une demande énergétique élevée, à la différence d'un système fonctionnant en continu.

L'utilisation de hottes lors des opérations de vidange et de coulée sont également des techniques à prendre en compte. Les fumées produites par la vidange sont principalement constituées d'oxydes des métaux utilisés dans le procédé de fusion. Le système de capotage doit prendre en compte l'accès pour le chargement et les autres opérations effectuées au niveau du four, et la manière dont les sources de gaz de procédé évoluent au cours d'un cycle de production. Un exemple de hotte conjoint pour le chargement et la vidange est donné ci-dessous.

EXEMPLE 5.04 COLLECTE DES FUMÉES

Description : Zone de chargement et de vidange simultanés d'un four rotatif.

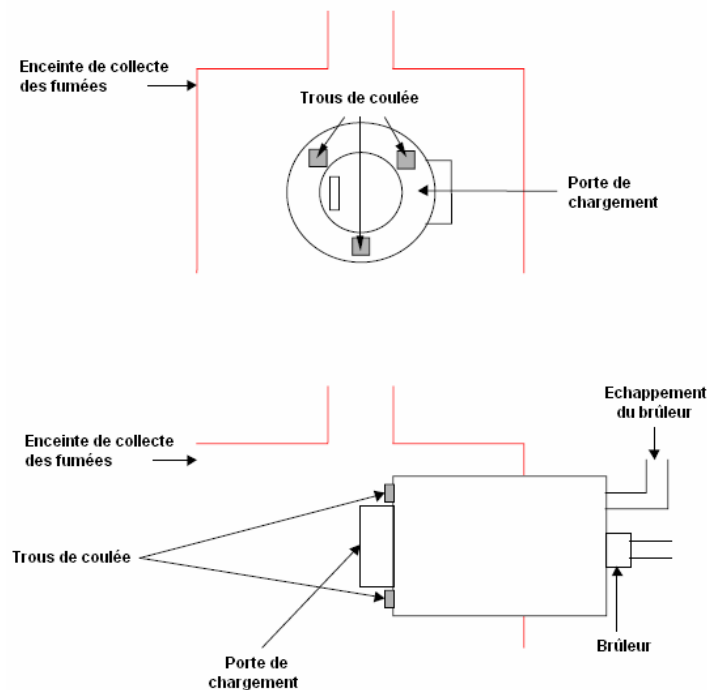


Figure 5.12 : Système conjoint de collecte des fumées

Du fait de l'usure du garnissage du four, les trous de coulée situés à l'extrémité de la porte peuvent empêcher la vidange de la totalité du métal.

Principaux bénéfices environnementaux : Collecte plus simple des fumées à partir d'un seul point.

Données opérationnelles : Données non disponibles.

Effets croisés : Effet positif : efficacité de collecte élevée et consommation énergétique réduite.

Aspects économiques : Les coûts de modification sont faibles ; un certain nombre d'installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Tous fours rotatifs.

Exploitations de référence : France, RU, Allemagne.

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998 ; tm 120, TU Aachen 1999]

Plusieurs aspects spécifiques à un site donné sont concernés ; certains d'entre eux sont abordés plus haut dans ce chapitre. Associées à une dépollution adaptée, les techniques de process présentées dans ce chapitre sont en mesure de satisfaire les exigences relatives à une protection stricte de l'environnement.

Réactif utilisé	Constituant des effluents gazeux	Méthode de traitement
Solvants, COV (pour l'In, le Ga, etc.)	COV	Condensation. Charbon actif, biofiltre
Chlore, HCl (pour l'In, le Ga, etc.)	Cl ₂	Collecte. Système d'épuration à la soude caustique
Acide nitrique (pour l'In, le Ga, etc.)	NO _x	Oxydation et absorption, recyclage, système d'épuration
Ammoniac (pour l'In, le Ga, etc.)	NH ₃	Récupération, système d'épuration
Oxydes d'antimoine et d'arsenic	Stibine ou arsine	Oxydation et absorption dans un système d'épuration

Tableau 5.38 : Méthodes de traitement chimique appliquées aux constituants gazeux

5.3.10 Unités d'acide sulfurique

Le dioxyde de soufre produit au cours des étapes de fusion, de frittage et de grillage peut avoir un impact environnemental important ; c'est pourquoi il est éliminé des gaz soit dans une unité d'acide sulfurique, soit par récupération sous forme de dioxyde de soufre. Les différents procédés utilisés pour éliminer le dioxyde de soufre, décrits dans la section 2.8 du présent document, doivent être évalués par rapport à la concentration de dioxyde de soufre obtenue à l'issue des étapes de frittage, de grillage ou de fusion. Le procédé utilisé dépend également des conditions du marché local du dioxyde de soufre liquide ; celui-ci est généralement converti en acide sulfurique. Différents facteurs affectent la production d'acide sulfurique, et certains sont spécifiques aux métaux abordés dans cette section. L'ensemble de ces techniques est à prendre en considération dans la détermination des MTD.

L'enrichissement à l'oxygène effectué dans certains fours de fusion directe induit une teneur élevée en dioxyde de soufre, et bien que celui-ci soit ensuite dilué en vue de la conversion jusqu'à une teneur inférieure à 14 % de SO₂, la diminution du volume de gaz permet de réaliser des économies importantes sur la taille des conduites, des ventilateurs et de l'unité de dépollution. L'autre facteur associé aux gaz fortement concentrés est la possibilité d'utiliser l'excès de chaleur des gaz, notamment après les étapes de catalyse, qui sont fortement exothermiques. La dilution des gaz qui s'ensuit assure également la présence d'une quantité suffisante d'oxygène pour la catalyse.

L'autre facteur ayant une incidence sur la teneur en dioxyde de soufre est la teneur faible et variable des gaz provenant de certaines unités de frittage. Cette variation de la teneur en SO₂ est un paramètre en fonction duquel doit être conçue l'unité d'acide sulfurique, du point de vue de l'épuration et du transfert de chaleur, mais aussi du catalyseur utilisé. Comme cela a été indiqué précédemment, les catalyseurs se sont diversifiés, et ceux dopés à l'oxyde de césium peuvent contribuer à améliorer les performances. En présence de gaz faiblement concentrés, il peut être nécessaire de fournir de la chaleur supplémentaire aux gaz afin de maintenir une température correcte dans les étages du catalyseur.

Les performances d'une unité d'acide sulfurique métallurgique dépendent de celles de la section d'épuration des gaz. Si le système d'épuration ne parvient pas à éliminer les impuretés contenues dans les gaz entrants, les performances de la section de contact vont se dégrader. Bien que la conception des systèmes d'épuration des gaz par voie humide puisse varier largement, un certain nombre de caractéristiques et d'exigences communes sont associées aux épurateurs :

- les polluants solides doivent être éliminés de façon à obtenir un gaz d'une qualité < 1 mg de poussières/Nm³ (gaz clair à l'œil nu) ;
- la teneur des gaz en trioxyde de soufre doit être réduite à 15 – 25 mg/Nm³ ;

- les fluorures et les chlorures doivent être éliminés afin d'éviter que le briquetage de la tour aval et le catalyseur de conversion ne soient endommagés ;
- les gaz doivent être refroidis jusqu'à une température assurant le bilan en eau de l'unité d'acide sulfurique. La température dépend de la teneur des gaz en SO_2 et de la concentration de l'acide produit. En présence d'un gaz présentant une teneur en SO_2 de 4 à 6 %, il faut abaisser les températures en deçà de 30 °C, tandis qu'un gaz présentant une teneur en SO_2 largement supérieure à 10 % tolère des températures d'environ 35 à 40 °C, lorsque l'on produit de l'acide d'un indice de 98,5 %.

On connaît généralement le taux de conversion de dioxyde de soufre en trioxyde de soufre associé à ces procédés ; ce taux est compris entre 98,5 % et 99,8 % pour les gaz produits au moyen de différents procédés. Au niveau local, une série de facteurs affectent le taux de conversion et ceux-ci doivent être pris en compte :

- propreté des gaz entrants, afin de réduire l'empoisonnement du catalyseur ;
- concentration et variation des gaz entrants – les gaz plus concentrés et les teneurs plus constantes en SO_2 permettent généralement d'obtenir de meilleurs rendements de conversion, en partie en raison du refroidissement cohérent des gaz entre chaque étage en présence de variations limitées de la concentration ;
- choix du catalyseur – les catalyseurs dopés à l'oxyde de césium tendent à accroître les taux de conversion, dès lors que les autres facteurs sont régulés pour empêcher l'empoisonnement. Les changements de catalyseur effectués en routine peuvent permettre d'optimiser le catalyseur au cours de la maintenance mais doivent, pour être totalement effectifs, s'accompagner d'améliorations dans d'autres domaines ;
- une température des gaz entrants, une teneur en oxygène et un bilan en eau (voir ci-dessus) corrects ;
- ajustement effectif des paramètres liés aux gaz (température, notamment), entre chaque étage du catalyseur.

Les taux de conversion varient donc avec le temps et les valeurs en régime stable peuvent s'avérer trompeuses ; les exemples suivants sont néanmoins représentatifs des performances que peuvent atteindre des unités bien conçues fonctionnant avec différentes caractéristiques de gaz entrants.

EXEMPLE 5.05 PROCÉDE « WET GAS SULPHURIC ACID » (WSA) APPLIQUE A UN EFFLUENT GAZEUX PRESENTANT UNE TENEUR REDUITE EN SO_2

Description : Ce procédé est parfaitement approprié pour le traitement des effluents gazeux présentant une faible teneur en SO_2 . La catalyse permet de convertir jusqu'à 99,3 % du SO_2 en SO_3 , qui réagit avec l'eau présente dans les gaz pour former de l'acide sulfurique gazeux. Celui-ci est traité dans un condenseur WSA. Du fait de l'économie de chaleur et de l'influence limitée de l'équilibre en eau, il n'est pas nécessaire de procéder à une combustion supplémentaire du soufre. La technologie WSA utilise un catalyseur à base de vanadium activé au potassium et au sodium dans des anneaux extrudés de 10 et 20 mm.

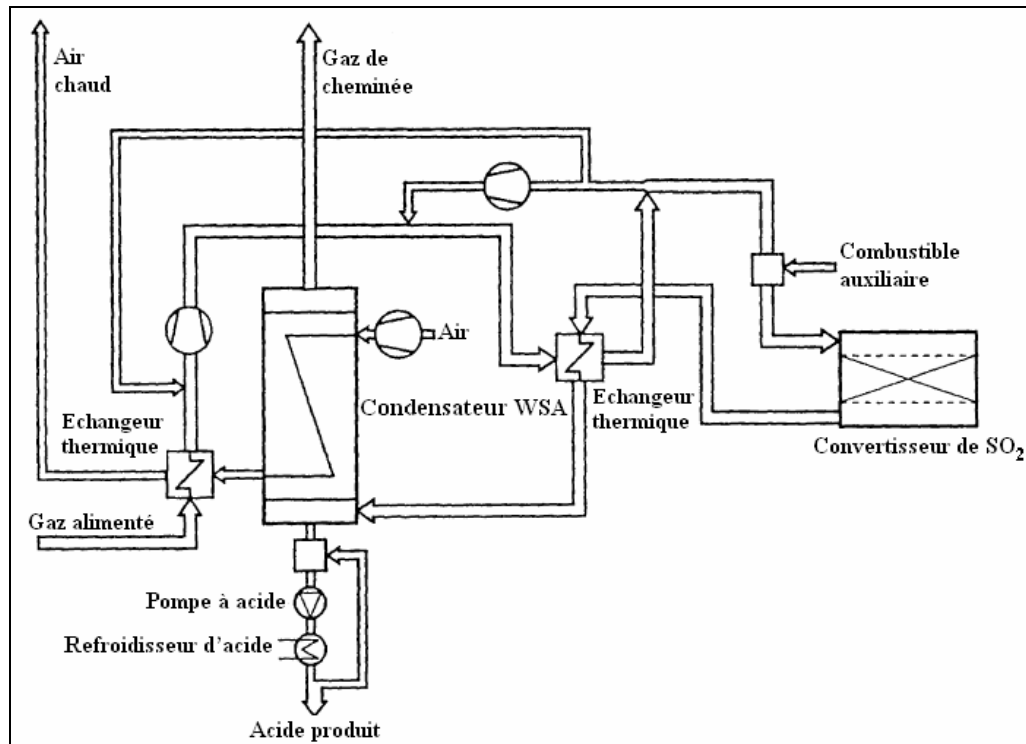


Figure 5.13 : Diagramme du procédé WSA

Principaux bénéfices environnementaux : La conversion du SO₂ en acide sulfurique réduit les émissions de SO₂, donc l'effet des pluies acides.

Données opérationnelles : Le tableau ci-dessous présente les données-types d'une unité WSA.

	Grillage du plomb
Débit [Nm ³ /h]	100 000
T _{entrée} [°C]	30 - 35
T _{sortie} [°C]	105
H ₂ O entrant [% en vol.]	5,5
O ₂ entrant [% en vol.]	14,2
Teneur en SO ₂ [% en vol.]	2,0 - 3,5
Conversion [%]	99
Teneur en SO ₃ du gaz propre [mg/Nm ³]	< 28
H ₂ SO ₄ produit [% en poids]	> 97,5
T du produit [°C]	21
Production d'acide [t métrique par jour]	~ 290
Consommation d'énergie (électricité et combustible) [kWh/t]	200 - 300 (pour une teneur en SO ₂ de 2,7 %)
Consommation d'eau de refroidissement [Gcal/h/t d'acide]	0,25 (ΔT = 5 °C)

Tableau 5.39 : Performances du système WSA

Effets croisés : Le procédé WSA ne génère ni déchets, ni eaux usées, et n'utilise ni absorbants, ni autres produits chimiques.

Aspects économiques : Données non disponibles ; un certain nombre d'installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Le procédé WSA est applicable à toutes les installations neuves ou existantes, notamment aux fours de grillage utilisés pour la molybdénite et le plomb dont la teneur en SO_2 est inférieure à 5 – 6 %.

Exploitations de référence : France

Documents de référence : [tm/165, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm/166, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm/167, Bendixen, Haldor Topsøe, 1997], [tm/ SADACI 1999]

EXEMPLE 5.06 UNITE D'ACIDE SULFURIQUE FONCTIONNANT AVEC CARACTERISTIQUES DE GAZ VARIABLES

Description : Section d'épuration et de lavage des gaz. Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption , 4 étages. Acide faible à neutraliser. ~ 12-15 m³/h avec une teneur en H_2SO_4 de 5 %.

Principaux bénéfices environnementaux : Taux de conversion de SO_2 élevé : une installation récente est ainsi parvenue à un taux de 99,6 %.

Données opérationnelles :

Données de sortie (valeurs mesurées) :	
Volume d'effluents gazeux :	34 200 Nm ³ /h
SO_x	685 mg/ Nm ³
SO_3	28 mg/ Nm ³
NO_x (unité NO_2)	114 mg/ Nm ³
Cl^- (unité HCl)	1,1 mg/ Nm ³
F^- (unité HF)	< seuil de détection
Concentration moyenne :	
Cd	0,02 mg/ Nm ³
Hg	< seuil de détection
Tl	< seuil de détection
As	< 0,05 mg/ Nm ³
Se	< seuil de détection
Sb	< seuil de détection
Pb	0,17 mg/ Nm ³
Cu	0,25 mg/ Nm ³
PCDD/PCDF	< seuil de détection

Tableau 5.40 : Performances de l'unité d'acide sulfurique

Effets croisés : Effet positif – réduction des émissions principales de dioxyde de soufre par conversion du SO_2 en acide sulfurique ; récupération de la chaleur des gaz et de la chaleur émise pendant la conversion.

Aspects économiques : Un certain nombre d'installations sont économiquement viables. Voir également les annexes concernant les coûts.

Applicabilité : Effluents gazeux provenant des fours de grillage ou de fusion. Ces caractéristiques s'appliquent également à la plupart des installations existantes.

Exploitations de référence : Allemagne

Documents de référence : [tm 102, DFIU Zn 1999]

L'autre facteur à prendre en compte lorsque des gaz très fortement concentrés sont utilisés dans une unité d'acide sulfurique est la teneur en SO₂ résiduel des gaz rejetés. La majeure partie des installations européennes présente un rendement de conversion situé entre 99,5 et 99,8 %. Ce taux de conversion ne tient pas compte des périodes de démarrage et d'arrêt ni des opérations effectuées en urgence.

5.3.11 Régulation du procédé

Les principes de régulation des procédés présentés dans la section 2.6 sont applicables aux procédés de production utilisés pour ce groupe de métaux. Beaucoup de ces techniques permettent d'optimiser certains fours et procédés présentés. Il faut prêter une attention particulière à la mesure et à la régulation de la température des fours et des cuves utilisés pour effectuer la fusion des métaux de ce groupe, de façon à éviter ou à minimiser la formation de fumées.

Les procédés et techniques de régulation du four et de la température de fusion sont applicables aux installations neuves ou existantes.

5.3.12 Eaux usées

Les eaux usées constituent un aspect spécifique à un site donné. D'après les chiffres, les systèmes de traitement existants sont performants. L'intégralité du volume d'eaux usées doit être traitée pour éliminer les métaux dissous et les matières solides ; dans certains cas, on met en œuvre un procédé de précipitation en deux étapes : on effectue un traitement à l'hydroxyde, puis au sulfure, pour assurer l'élimination du plomb et du cadmium [tm 171, Steil & Hahre 1999]. Les techniques énumérées dans la section 2.9 sont les techniques à prendre en compte. Dans certaines installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées (y compris les eaux de pluie) sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

5.3.13 Résidus de procédé

Les procédés présentés plus haut comme techniques disponibles sont tous des procédés à considérer lors de la détermination des MTD. La nature spécifique des matériaux entrants détermine le choix final du procédé. En complément à ces procédés, les techniques présentées dans le Chapitre 2 doivent également être prises en compte.

5.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêter une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associées présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production du plomb et du zinc : poussières, métaux dans les fumées, COV (y compris les dioxines), odeurs, SO₂, autres gaz acides, eaux usées, résidus tels que les boues, les poussières sous filtre et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de

l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « incluant les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations neuves peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifiques devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles sont influencées par un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par des matières organiques. Il peut y avoir une ou plusieurs source(s) de matières premières primaires, des matières premières secondaires de qualité variable ou un mélange de matières premières primaires et secondaires.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; ainsi, certains procédés permettent d'éviter tout transfert en poches et sont donc plus faciles à conduire de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux recyclés et permettent donc de minimiser l'impact environnemental en empêchant leur rejet.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les matières premières disponibles sur le site et la capacité de traitement de l'installation – ces questions sont donc spécifiques à un site donné. Les procédés primaires capables de fonctionner avec des matières premières secondaires présentent certains avantages.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?

- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées par le procédé (par ex., lors de la fusion primaire, certains procédés sont appropriés pour les concentrés « propres », et d'autres sont prescrits lorsque la charge est complexe) ?
- La nature de la charge et des autres métaux qu'elle contient (Cu, Sb, Bi, par ex.) a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les niveaux d'émissions atteignables sont présentés plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

A l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et de techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de capacité de production réalisable et de matériau pouvant être utilisé; il existe donc différentes combinaisons possibles. Tous ces procédés maximisent la réutilisation des résidus tout en minimisant les émissions dans le milieu aquatique. Leurs caractéristiques économiques varient. Certains doivent fonctionner à une capacité élevée pour être rentables, tandis que d'autres ne permettent pas de fournir d'importantes capacités de production.

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD »; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un process ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local.

5.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions relatives aux meilleures techniques disponibles en termes de stockage et de manutention des matériaux figurant dans la section 2.17 de ce document sont applicables aux métaux du présent chapitre.

5.4.2 Choix du procédé

Il est impossible de conclure que seul un procédé de production est applicable à ce groupe de métaux. Les techniques utilisées lors des étapes de procédé suivantes sont considérées comme MTD pour les matières premières disponibles.

5.4.2.1 Fusion du plomb primaire

Du point de vue méthodologique, les techniques suivantes sont considérées comme MTD pour la production de plomb lorsqu'elles sont associées aux procédés de collecte et de dépollution appropriés.

Appliquée à ces procédés, l'utilisation conjointe de systèmes performants de collecte et de dépollution des gaz et de techniques de récupération de l'énergie offre des avantages en termes d'efficacité énergétique, de coûts, de capacités de production et de facilité de modernisation.

Les gaz provenant des procédés de frittage, de grillage et de fusion directe doivent être traités pour éliminer les poussières et les métaux volatils, récupérer la chaleur ou l'énergie ; le dioxyde de soufre doit également être récupéré ou converti en acide sulfurique en fonction des conditions du marché local pour le dioxyde de soufre.

Technique appliquée	Matières premières	Commentaires
Procédé Kaldo TBRC (en enceinte totalement fermée)	Concentrés de plomb et plomb secondaire (cas le plus fréquent)	Alimentation sèche, teneur variable en SO ₂ . Fonctionne dans une installation complexe avec d'autres fours de fusion du Cu.
ISF et distillation New Jersey	Concentrés Zn/Pb	Alimentation frittée. Une étape de frittage en enceinte fermée est nécessaire.
QSL	Concentrés de plomb et matières premières secondaires	Alimentation humide et agglomérée
Four Kivcet	Concentrés Cu/Pb et matières premières secondaires	Alimentation sèche
Four Kaldo	Concentrés de plomb et matières premières secondaires	Alimentation humide et agglomérée
Four ISA Smelt	Concentrés de plomb et matières premières secondaires	Alimentation humide et agglomérée
Haut fourneau	Plomb complexe fait de matières premières primaires et secondaires	Nécessite des systèmes de régulation du procédé, de collecte et de dépollution des gaz très performants. Le frittage doit s'effectuer en enceinte fermée ou en association avec un autre four.

Tableau 5.41 : Fours de fusion du plomb primaire considérés comme MTD

5.4.2.2 Fusion du plomb secondaire

Pour la production de plomb à partir de matières premières secondaires, il faut également tenir compte, au niveau local, des variations du stock de matériaux entrants car ils ont une incidence sur le choix des combinaisons de fours et des systèmes de collecte et de dépollution associés. Les procédés considérés comme MTD sont les suivants : haut fourneau (avec un dispositif de régulation performant), ISA Smelt/Ausmelt, four électrique et four rotatif.

Le four électrique à arc immergé est utilisé pour les matériaux mixtes à base de cuivre et de plomb. Il s'agit d'une unité hermétique qui est donc, par nature, plus propre que les autres procédés dès lors que le système d'extraction des gaz est conçu et dimensionné de façon adéquate. A l'heure de la rédaction du présent document, le four électrique est utilisé pour les matières premières secondaires contenant du soufre ; il est relié à une unité d'acide sulfurique. Les données indiquent que le volume de gaz produit est inférieur à celui des autres fours et que la taille de l'unité de dépollution pourrait donc être plus petite.

Technique appliquée	Matières premières	Commentaires
Four électrique à arc immergé	Matériaux à base de Cu/Pb	Four hermétique, volumes de gaz réduits.
Four ISA Smelt	Matières premières secondaires (cas le plus fréquent)	Le traitement du laitier doit faire la preuve de son efficacité.
Four rotatif	Matières premières secondaires, le plus souvent	Procédé discontinu ; peut offrir davantage de flexibilité pour différents métaux.
Haut fourneau	Batteries entières	Efficacité énergétique élevée. Nécessite une régulation stricte des performances, une dépollution en chambre de post-combustion et un suivi des émissions.
Creusets et cuves de fusion	Plomb propre et déchets métalliques propres, uniquement	Régulation nécessaire de la température des cuves.

Tableau 5.42 : Fours de fusion du plomb secondaire considérés comme MTD

5.4.2.3 Procédés d'affinage du plomb

Les étapes d'affinage considérées comme MTD sont toutes les techniques citées comme techniques appliquées. La combinaison de procédés d'affinage à utiliser dépend des métaux présents dans le plomb d'œuvre.

Le cuivre est éliminé et séparé sous forme de scories de sulfure. L'arsenic, l'antimoine et l'étain sont éliminés par oxydation avec un mélange de nitrate de sodium et de soude caustique, suivie d'un écrémage mécanique destiné à éliminer les scories d'oxydes. Il est également possible d'utiliser un mélange d'air et d'oxygène. La désargentation s'effectue au moyen du procédé Parkes et la dézincification est réalisée par distillation sous vide. Le bismuth est éliminé par traitement avec un mélange de calcium et de magnésium (procédé Kroll-Betterton).

Ces procédés peuvent être associés à des systèmes primaires (et, au besoin, secondaires) efficaces de collecte des fumées. La régulation de la température des cuves d'affinage revêt une importance particulière pour la prévention des fumées de plomb et le chauffage indirect est plus efficace pour réaliser cela.

5.4.2.4 Zinc primaire

Les systèmes de grillage et de récupération du soufre ainsi que les procédés hydro-métallurgiques présentés plus haut comme techniques à prendre en compte sont tous considérés comme MTD. La nature spécifique des matières premières disponibles influence le choix final du procédé, notamment le mode de précipitation du fer. Les techniques appropriées de suivi et d'élimination de l'arsine et de la stibine doivent également être prises en compte en complément de ces procédés.

5.4.2.4.1 Purification de l'électrolyte

Les procédés présentés plus haut comme techniques à prendre en compte sont tous considérés comme MTD. La nature des matières premières disponibles influence le choix final du procédé. Il faut prêter une attention particulière à l'évaluation du risque d'émission d'arsine et de stibine au cours des étapes de purification de l'électrolyte, leur élimination s'effectuant par épuration des gaz provenant du traitement chimique à l'aide d'un agent oxydant tel que du permanganate de potassium.

5.4.2.5 Zinc secondaire

Les procédés présentés plus haut comme techniques à prendre en compte sont tous considérés comme MTD dès lors que des systèmes performants de régulation des procédés, de collecte et de dépollution des gaz sont mis en place. Ces procédés comprennent :

- la séparation physique, la fusion et d'autres techniques de traitement à haute température suivies de l'élimination des chlorures ;
- l'utilisation de fours Waelz, de fours Cyclone ou de convertisseurs pour élever la température et volatiliser les métaux puis former les oxydes qui seront ensuite récupérés dans les gaz par filtration ;

La nature des matières premières disponibles influence le choix final du procédé. Les techniques présentées dans le Chapitre 2 devraient également être prises en compte en complément de ces procédés, notamment la régulation thermique des fours et les systèmes de collecte et de dépollution des fumées.

5.4.2.6 Cadmium et autres métaux

Les procédés présentés plus haut comme techniques à prendre en compte sont tous considérés comme MTD. La nature des matières premières disponibles influence le choix final du procédé. Les techniques appropriées présentées dans le Chapitre 2 devraient également être prises en compte en complément de ces procédés, notamment la manutention, le stockage, le prétraitement et les systèmes de collecte et de dépollution des fumées. Du fait de la toxicité élevée de ces métaux et de leurs composés, le choix du procédé et des systèmes de régulation et de dépollution nécessite un soin supplémentaire.

5.4.2.7 Autres étapes de traitement

5.4.2.7.1 Extraction électrolytique

Les procédés présentés plus haut comme techniques à prendre en compte sont tous considérés comme MTD. La nature des matières premières disponibles influence le choix final du procédé. Les techniques appropriées présentées dans le Chapitre 2 devraient également être prises en compte en complément de ces procédés, notamment la prévention, la collecte et la récupération des brouillards provenant des cellules électrolytiques.

Étape de procédé	Technique	Commentaires
Extraction électrolytique	Cathode permanente Réduction de la formation de brouillard au niveau de la cellule	Le système de collecte des brouillards renvoie l'acide dans le procédé.
Vaporisation du laitier et four Waelz	Méthodes citées plus haut capables de fournir un produit utilisable immédiatement	Récupération de l'énergie Destruction des dioxines
Cassage des batteries	Procédé en 2 étapes ; pour permettre une séparation étagée et une minimisation de la contamination de la fraction plastique.	Collecte et réutilisation de l'acide des batteries Collecte des brouillards

Tableau 5.43 : Résumé des autres étapes de procédé considérées comme meilleures techniques disponibles

5.4.2.8 Collecte et dépollution des gaz

Les systèmes de collecte des fumées utilisés peuvent tirer parti de dispositifs de mise en étanchéité des fours et être conçus de façon à y maintenir une dépression appropriée afin d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Il est possible d'avoir recours à des systèmes assurant l'étanchéité des fours ou de mettre en place des hottes. Les ajouts de matériaux s'effectuent par exemple par la hotte, par les tuyères, par les lances, ou en plaçant sur les dispositifs d'alimentation des valves rotatives solides. Il est possible de réduire la consommation énergétique au moyen d'un système intelligent de collecte des gaz capable de cibler l'extraction des fumées selon la source et la durée des émissions de fumées.

Les meilleures techniques disponibles concernant les dispositifs de traitement des gaz et des fumées sont celles qui assurent un refroidissement et une récupération de la chaleur avant filtre à manches, si la configuration le permet, sauf lorsque cette étape s'effectue lors de la production d'acide sulfurique ; ce point est traité dans les paragraphes ci-dessous. Il est possible d'utiliser des filtres à manches constitués de matériaux haute performance modernes associés à une structure bien conçue et convenablement entretenue. Ces filtres comportent des systèmes de détection de rupture de manche et des méthodes de décolmatage en ligne.

Les systèmes de récupération du soufre et les étapes associées de récupération des poussières et des métaux sont ceux décrits dans la section 2.8 du présent document ; la production d'acide sulfurique constitue la technique la plus applicable, à moins qu'il n'existe des débouchés locaux pour le dioxyde de soufre. L'étape d'épuration des gaz réalisée avant l'unité d'acide sulfurique comprend une combinaison de filtres électrostatiques par voie sèche, d'épurateurs par voie humide, de techniques d'élimination du mercure et de filtres électrostatiques par voie humide. Les facteurs qui affectent les procédés de cette section sont décrits plus haut dans la section intitulée « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD ».

Les systèmes de granulation du laitier nécessitent un laveur à venturi ou un électrofiltre par voie humide du fait de la charge élevée de vapeur. Les gaz émis par les procédés ISF imposent également la mise en œuvre d'une épuration par voie humide de façon à ce que les gaz soient refroidis avant d'être utilisés comme combustible.

Étape de procédé	Constituant des effluents gazeux	Option de dépollution
Manutention des matières premières	Poussières et métaux	Stockage adéquat Collecte des poussières et filtre à manches
Prétraitement des matières premières (élimination mécanique ou chimique du revêtement)	Poussières et métaux Matière organique*	Prétraitement adéquat Collecte des gaz et filtre à manches Fonctionnement du procédé, post-combustion, injection de carbone et refroidissement adéquat des gaz
Grillage et fusion primaires ; frittage	Poussières, métaux et dioxyde de soufre ; Hg	Fonctionnement du procédé, collecte, épuration (filtres électrostatiques par voie humide ou sèche, etc.) et refroidissement des gaz, unité d'acide sulfurique
ISF	Monoxyde de carbone, vapeurs métalliques	Épuration par voie humide (pour refroidir les gaz) avant d'utiliser les gaz comme combustible à faible pouvoir calorifique
Granulation du laitier	Vapeur, poussières, H ₂ S, SO ₂	Électrofiltre par voie humide, épurateur
Fusion secondaire	Poussières et métaux Matière organique * Dioxyde de soufre **	Fonctionnement du procédé, collecte et refroidissement des gaz, filtre à manches Fonctionnement du procédé, post-combustion, injection de carbone et refroidissement adéquat des gaz Épuration si nécessaire
Affinage chimique	Brouillard et métaux (As, Sb)	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz avec épurateur oxydant
Extraction par solvant	COV et odeurs	Confinement, condensation ; filtre carbone ou biofiltre si nécessaire
Extraction électrolytique	Brouillards acides	Collecte des gaz, épuration / dévésiculeur
Affinage thermique	Poussières et métaux Dioxyde de soufre **	Fonctionnement du procédé; collecte et refroidissement des gaz et filtre à manches Épuration si nécessaire
Fusion, préparation des alliages, coulée et production de poussières	Poussières et métaux Matière organique *	Fonctionnement du procédé; collecte et refroidissement des gaz et filtre à manches Fonctionnement du procédé, post-combustion, injection de carbone et refroidissement adéquat des gaz
Vaporisation du laitier et procédés à four Waelz	Poussières et métaux Matière organique *	Fonctionnement du procédé; collecte et refroidissement des gaz et filtre à manches ou électrofiltre par voie humide si une trempe humide est utilisée Fonctionnement du procédé, post-combustion, injection de carbone ou injection de charbon actif et refroidissement adéquat des gaz
Note : * Les matières organiques comprennent des COV présentés comme étant du carbone total (monoxyde de carbone exclu), des dioxines et du monoxyde de carbone ; la teneur exacte dépend de la teneur en matières organiques des matières premières utilisées. ** Du dioxyde de soufre peut être présent si l'on utilise des matières premières ou des combustibles contenant du soufre (pâte de batterie, par ex.) et que le soufre n'est pas fixé dans un laitier ou dans une matte.		

Tableau 5.44 : Résumé des options de dépollution applicables aux constituants des effluents gazeux

Les systèmes de collecte des fumées sont conformes aux meilleures pratiques présentées pour les techniques abordées dans la section 2.7. Les systèmes de dépollution considérés comme MTD pour les constituants susceptibles d'être présents dans les effluents gazeux sont énumérés dans le tableau suivant. Les variations éventuelles de matières premières peuvent avoir une influence sur l'éventail de ces constituants ou sur l'état physique de certains d'entre eux (taille et propriétés physiques des poussières produites, notamment) ; cette éventualité doit être évaluée au niveau local.

5.4.2.9 Émissions dans l'air associées à l'application des MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions captées / réduites provenant des différentes sources, auxquelles s'ajoutent les émissions fugitives ou non-captées provenant de ces mêmes sources. Convenablement utilisés, les systèmes modernes permettent une élimination efficace des polluants. Les informations disponibles à l'heure de la rédaction du présent document indiquent que les émissions fugitives peuvent être la principale source d'émissions totales.

Pour l'ensemble des procédés, les émissions totales dans l'air comprennent celles provenant :

- des étapes de manutention et de stockage, de séchage, d'agglomération, de frittage, de grillage et de fusion des matériaux ;
- de la vaporisation du laitier et des procédés réalisés en fours Waelz ;
- des étapes d'affinage chimique, d'affinage thermique et d'extraction électrolytique ;
- des étapes de fusion, de préparation des alliages, de distillation, de coulée, etc.

Les émissions fugitives peuvent être extrêmement importantes ; il est possible d'établir des prévisions en s'appuyant sur le rendement de captage des gaz de procédé et en effectuant une surveillance de l'environnement (voir la section 2.7).

Les tableaux suivants présentent de façon schématique les différentes techniques et les émissions associées.

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Effluents gazeux à faible teneur en SO ₂ (~ 1 – 4 %)	Rendement de conversion > 99,1 %	Unité de production d'acide sulfurique de contact à simple absorption ou procédé WSA (la teneur en SO ₂ des gaz de queue dépend de la concentration des gaz entrants)	Pour les gaz à faible teneur en SO ₂ . Ces procédés doivent être associés à un épurateur par voie sèche ou semi-sèche afin de réduire les émissions de SO ₂ et produire du gypse, s'il existe des débouchés.
Effluents gazeux à teneur élevée en SO ₂ (> 5 %)	Rendement de conversion > 99,7 %	Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption (la teneur en SO ₂ des gaz de queue dépend de la concentration des gaz entrants). Un dévésiculeur peut être adapté pour éliminer le SO ₃ résiduel.	Le traitement intensif des gaz (laveur humide, électrofiltre par voie humide et, au besoin, élimination du mercure pour garantir la qualité du H ₂ SO ₄ produit) avant l'unité de contact permet d'atteindre un niveau minime d'autres polluants atmosphériques.
Note : Émissions collectées uniquement.			

Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.

S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.

Tableau 5.45 : Émissions dans l'air provenant des étapes de fusion, de grillage et de frittage primaires associées à l'utilisation des MTD dans le secteur du plomb et du zinc

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Brouillards acides	< 50 mg/Nm ³	Dévésiculateur Laveur humide alcalin	Un dévésiculateur permet de réutiliser l'acide collecté.
Arsine, stibine	< 0,5 mg/Nm ³	Épurateur oxydant	
COV ou solvants (unité C)	< 5 mg/Nm ³	Confinement, condensation, filtre carbone ou biofiltre	
<p>Note : Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 5.46 : Émissions dans l'air provenant des étapes d'affinage chimique, d'extraction électrolytique et d'extraction par solvant

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches (régulation thermique nécessaire des cuves et des récipients de fusion pour empêcher la volatilisation des métaux)	Les filtres à manches haute performance peuvent permettre d'atteindre des niveaux bas de métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à celle des poussières et à la teneur en métaux des poussières.
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 - 300 mg/Nm ³	Brûleur bas NO _x Brûleur oxycombustible	Les valeurs élevées correspondent à un enrichissement à l'oxygène pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, le volume de gaz et l'émission en masse sont réduits.
Carbone organique total - unité C (si présent)	< 5 - 15 mg/Nm ³ < 5 - 50 mg/Nm ³	Dispositif de post-combustion Combustion optimisée	
Dioxines (si présentes)	< 0,1 – 0,5 ng/Nm ³ TEQ/Nm ³	Système d'élimination des poussières à haute efficacité (filtre à manches), post-combustion puis trempe. D'autres techniques sont disponibles (adsorption sur charbon actif, catalyseur d'oxydation, par ex.).	Il peut être nécessaire de traiter les gaz propres et dépoussiérés pour atteindre des niveaux d'émissions bas.
<p>Note : Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 5.47 : Émissions dans l'air provenant des étapes de fusion du matériau propre, de la préparation des alliages et de la production de poussière de zinc

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches, électrofiltre par voie humide (Il est possible d'utiliser un électrofiltre par voie humide dans le cas de gaz émis lors de la granulation du laitier ou de la trempe des gaz par voie humide)	Les filtres à manches haute performance peuvent permettre d'atteindre des niveaux bas de métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à celle des poussières et à la teneur en métaux des poussières.
SO ₂	< 50 - 200 mg/Nm ³	Laveur humide alcalin Epurateur par voie semi-sèche utilisant un réactif alcalin et filtre à manches	
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 – 300 mg/Nm ³	Brûleur à bas NO _x Brûleur oxycombustible	Les valeurs élevées correspondent à un enrichissement à l'oxygène pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, le volume de gaz et l'émission en masse sont réduits.
CO et vapeurs métalliques	Aucune émission	Laveur humide	Refroidissement et épuration des gaz provenant d'un ISF avant de les utiliser comme combustibles
Carbone organique total sous (unité C)	< 5 – 15 mg/Nm ³ < 5 – 50 mg/Nm ³	Dispositif de post-combustion Combustion optimisée	Prétraitement des matières secondaires afin d'éliminer les revêtements organiques si nécessaire
Dioxines	< 0,1 – 0,5 ng TEQ/Nm ³	Système d'élimination des poussières à haute efficacité (filtre à manches), post-combustion puis trempe. D'autres techniques sont disponibles (adsorption sur charbon actif, injection de charbon actif ou de chaux, par ex.).	

Note : Émissions collectées uniquement.

Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.

S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée. Concernant l'élimination du SO₂ ou du carbone total, les variations de la concentration de gaz brut au cours des procédés discontinus peuvent affecter les performances du système de dépollution.

Tableau 5.48 : Émissions dans l'air provenant du prétraitement, de la fusion secondaire, de l'affinage thermique et de la fusion des matériaux, de la vaporisation du laitier et du fonctionnement du four Waelz

La teneur en métaux des poussières varie considérablement d'un procédé à l'autre, mais aussi, pour un type de four donné, en fonction de la nature des matières premières utilisées. Dans ce document, il n'est donc pas possible de détailler avec précision les concentrations atteignables spécifiques à chaque métal émis dans l'air.

Certains métaux comportent des formes toxiques qui peuvent être émises lors des procédés, et doivent ainsi être réduites afin de satisfaire aux normes de la qualité de l'air spécifiques aux niveaux local, régional ou à longue distance. On considère que l'utilisation de systèmes de dépollution haute performance modernes (filtres à manchess à membrane, par ex.) permet d'atteindre des concentrations faibles de métaux lourds dès lors que la température de fonctionnement est adaptée et que la conception tient compte des caractéristiques des gaz et des poussières. Bien qu'il s'agisse d'un aspect spécifique à chaque site, le tableau suivant donne certaines indications relatives aux effets observés, au niveau local, sur la teneur en métaux des poussières.

Constituant	Four de grillage à lit fluidisé du zinc	Affinage du zinc	Procédé ISF	Procédés de fusion directe du plomb	Procédés appliqués au plomb secondaire	Affinage du plomb
Pb [%]	0,2 – 2	0,15 – 0,86	10 – 15	30 – 50	20 – 55	14 – 83
Zn [%]	50 – 60	52 – 76	20 – 50	3 – 5	0,01 – 10	3 – 28
Sb [%]	n.d.	n.d.	n.d.	-	0,1 – 40	n.d.
Cd [%]	0,2	0,02 – 0,7	0,5	3 – 5	0,01 – 10	n.d.
As [%]	0,004	0,01 – 0,1	n.d.	5 – 10	0,01 – 3	n.d.
n.d. : données non disponibles						

Tableau 5.49 : Teneur en métaux de certaines poussières émises par divers procédés de production du plomb et du zinc

5.4.3 Eaux usées

Les eaux usées constituent un aspect spécifique à un site donné. Il semble que les systèmes de traitement existants soient très performants. Dans le cas des métaux abordés dans la présente section, la précipitation effectuée à l'aide de sulfure ou d'une combinaison d'hydroxyde et de sulfure représente une solution particulièrement adaptée [tm 171, Steil/Hahre 1999]. L'intégralité du volume d'eaux usées doit être traitée pour éliminer les métaux, les matières solides et les huiles ou les goudrons. Les gaz acides absorbés (dioxyde de soufre ou HCl, par ex.) doivent être réutilisés ou au besoin neutralisés. Les techniques énumérées dans la section 2.9 sont les techniques à prendre en compte. Dans certaines installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées (eaux de pluie, notamment) sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

En termes de production primaire et secondaire des métaux de ce groupe, les émissions totales dans l'eau proviennent :

- du système de traitement ou de granulation du laitier ;
- du système de traitement des effluents gazeux ;
- du système de lixiviation et de purification chimique ;
- du procédé d'extraction électrolytique ;
- du système de traitement des eaux usées ;
- du drainage de surface.

Le tableau suivant présente les émissions associées dans l'eau après traitement des effluents. Ces données ne sont pas forcément transposables à toutes les installations.

	Principaux constituants [mg/l]				
	Pb	As	Hg	Cd	Zn
Eau de procédé	< 0,1	< 0,05	< 0,01	< 0,05	< 0,2
Note : Ces données sont basées sur un échantillon aléatoire pondéré ou sur un échantillon composite de 24 h. L'étendue du traitement des eaux usées dépend de leur source et de la nature des métaux qu'elles contiennent.					

Tableau 5.50 : Résumé des émissions associées dans l'eau, pour certains procédés

5.4.4 Résidus de procédé

L'utilisation ou le recyclage des laitiers, des boues et des poussières sous filtre est considérée comme partie intégrante des procédés mentionnés. Le choix de la méthode de précipitation du fer (goëthite ou jarosite) dépend des conditions locales et de la composition du concentré. Il peut être nécessaire de considérer un lavage efficace et une précipitation des métaux lixiviables sous forme de sulfures avant mise en décharge. La solubilité des résidus devraient être surveillée en réalisant un test standard sur le lixiviat. La mise en décharge des résidus doit satisfaire aux exigences définies dans la Directive relative à la mise en décharge des déchets.

Les procédés de production des métaux non-ferreux ont été développés par les industriels dans deux objectifs : maximiser la réutilisation de la majorité des résidus de procédé provenant des unités de production, ou produire ces résidus sous une forme qui permette de les utiliser dans d'autres procédés de production des métaux non-ferreux. Un aperçu des possibilités d'utilisation finale des résidus a été proposé plus haut dans ce chapitre ; dans le cas d'installations spécifiques, certains niveaux-types sont également présentés.

La quantité de résidus produite dépend largement des matières premières utilisées, notamment de la teneur en fer des matériaux primaires, de la teneur des matériaux primaires et secondaires en autres métaux non-ferreux et de la présence d'autres contaminants, tels que des matières organiques. Le niveau d'émissions dans le sol est donc fortement lié au site spécifique et aux matériaux spécifiquement utilisés, et dépend des facteurs abordés plus haut. Il est par conséquent impossible d'élaborer un tableau réaliste et représentatif des quantités associées à l'utilisation des MTD sans détailler les caractéristiques de chaque matière première. Les principes sur lesquels reposent les MTD comprennent la prévention et la limitation des déchets, ainsi que la réutilisation des résidus, si toutefois les conditions le permettent. Il faut tenir compte de la formation éventuelle d'arsine et de stibine induite par l'action de l'eau ou de la vapeur d'eau sur certains résidus.

La mise en œuvre de ces pratiques est particulièrement efficace au sein du secteur. Les tableaux 5.29 à 5.30 donnent un aperçu des possibilités d'utilisation et de traitement de certains résidus issus de la production de plomb et de zinc.

5.4.5 Coûts associés aux MTD

Les données relatives aux coûts ont été compilées pour un panel de procédés et de systèmes de dépollution diversifié. Ces chiffres sont très spécifiques à chaque site et dépendent d'un certain nombre de facteurs. Les fourchettes de valeurs proposées peuvent toutefois permettre d'établir des comparaisons. Les données

sont présentées en annexe à ce document de façon à ce que les coûts relatifs aux divers procédés et systèmes de dépollution appliqués à l'ensemble des métaux non-ferreux puissent être comparés.

5.5 Techniques émergentes

- Les concentrés de zinc provenant de mines plus récentes ou de développements en cours constituent à la fois des opportunités et des enjeux pour les fours de fusion traditionnels. Ces concentrés finement broyés sont souvent caractérisés par une faible teneur en fer, une teneur élevée en silice et en manganèse, et des traces d'éléments tels que le germanium, ce qui peut poser un problème. Les nouvelles techniques de procédé mises en place pour répondre à cette évolution sont les suivantes : déshydratation et manutention des matériaux adaptée aux concentrés ultrafins, nouveaux systèmes de transport, circuits de lixiviation adaptés à la silice, cellules d'élimination du manganèse et fusion dégressive [tm 101, NL Zn 1998]. Tous les producteurs n'ont pas accès à ce type de concentrés. Les techniques nouvelles requises pour leur traitement peuvent en outre produire d'autres résidus problématiques.
- Les réglementations environnementales relatives à l'élimination des résidus solides peuvent inciter à adopter un mode de traitement des résidus de fer consistant à fixer ces résidus par voie chimique sous la forme d'un ciment (procédé Jarofix, par ex.) ou d'un autre matériau tel que celui obtenu par réaction de la goëthite avec les laitiers de fer (procédé Gravelite). Ces deux procédés accroissent en revanche la quantité de matière produite et ne présenteront un intérêt que lorsque les produits obtenus seront utilisables dans le domaine des travaux publics.
- Les informations collectées indiquent que les procédés de lixiviation à base de chlorure utilisés pour récupérer le plomb et le zinc sont au stade de la démonstration [tm 206, TGI 1999].
- Les procédés Ausmelt et Outokumpu ont permis de faire la démonstration du traitement thermique de la jarosite et de la goëthite [tm 41, Ausmelt 1997 ; tm 101, NL Zn 1998]. Le zinc et les autres métaux volatils sont vaporisés puis récupérés ; le laitier produit pourrait être utilisé comme matériau de construction. Il n'a pas encore été prouvé que ces procédés étaient économiquement viables en tant que méthodes générales de traitement des résidus.
- Certaines unités ont expérimenté le traitement de la jarosite et des boues d'épuration dans un autoclave à 260 °C [tm 214, Vaartjes 1999]. On ne dispose que de peu d'informations, et on ignore quelle est la viabilité de ce procédé. La cellulose contenue dans les boues d'épuration est utilisée comme source d'énergie et le produit est un matériau en fusion. Les informations indiquent que le zinc, le plomb et l'argent sont concentrés puis vendus, tandis que le produit pierreux est utilisé comme matériau de construction.
- On a également fait la démonstration de la fusion de la jarosite et de la goëthite, mais ce procédé ne s'est pas avéré rentable.
- L'injection de matière fine via les tuyères d'un haut fourneau a été réalisée avec succès ; elle permet de limiter la manutention des matériaux pulvérulents et la consommation d'énergie en réalimentant les fines dans une unité de frittage.
- Les paramètres de régulation tels que la température sont utilisés pour les fours et les cuves de fusion et permettent de réduire la quantité de zinc et de plomb vaporisée par le procédé.
- Certains systèmes de régulation des fours employés dans d'autres secteurs pourraient être applicables au haut fourneau et à l'ISF.
- Le procédé EZINEX consiste en une lixiviation à base d'ammoniac/de chlorure d'ammonium suivie d'une cémentation puis d'une électrolyse. Il a été mis au point afin d'effectuer le traitement direct des poussières provenant des fours électriques à arc, et peut s'utiliser avec une alimentation de zinc secondaire plus riche [tm 120, Aachen 1999]. Une unité est actuellement en service.

- Mis en œuvre en novembre 1998, le procédé BSN traite les poussières agglomérées des fours électriques à arc par séchage, clinkérisation, réduction, volatilisation puis ré-oxydation pour produire du ZnO. D'après les inventeurs, ce procédé ne génère aucun déchet [tm 120, TU Aachen 1999].
- Le four de fusion flash Outokumpu a été utilisé dans le cadre d'un test pour produire du plomb par fusion directe. Des fours Waelz ont également été utilisés. Les publications spécialisées proposent de nombreux autres exemples de procédés n'ayant pas dépassé l'échelle pilote.

6 PROCÉDES DE PRODUCTION DES METAUX PRECIEUX

6.1 Procédés et techniques appliqués

Les métaux précieux peuvent être conventionnellement classés en trois groupes : argent, or et métaux du groupe platine (MGP). Leurs principales sources sont les minerais, les sous-produits issus de procédés de production d'autres métaux non-ferreux (boues anodiques provenant de la production du cuivre, résidus de lixiviation et métal brut issus de la production du zinc et du plomb, notamment) et les matériaux recyclés. De nombreuses matières premières sont soumises à la Directive concernant les déchets dangereux ; cela a un impact sur les systèmes de transport, de manutention et d'étiquetage. Les procédés de production sont les mêmes pour les matières premières primaires et secondaires ; ils sont donc présentés ensemble.

Une large gamme de procédés a été développée ; tous exploitent les propriétés chimiques de ces métaux. Bien que ces derniers soient relativement inertes, leur réactivité varie et les divers états d'oxydation des composés métalliques permettent d'utiliser toute une série de techniques de séparation [tm 5 & 19 HMIP PM 1993]. Par exemple, les tétraoxydes de ruthénium et d'osmium sont volatils ; aussi peuvent-ils être séparés facilement par distillation. De nombreux procédés utilisent des réactifs très puissants ou produisent des substances toxiques. La mise en œuvre de dispositifs de confinement, de systèmes sûrs après défaillance et de zones de drainage hermétiques permet de tenir compte de ces facteurs. Cette nécessité est accrue par la valeur élevée des métaux précieux.

Les procédés de production sont souvent confidentiels du point de vue commercial ; on ne dispose alors que de descriptions schématiques. Il existe généralement différentes combinaisons de procédés permettant de récupérer les métaux précieux présents dans une charge donnée. L'autre particularité du secteur est que la récupération des métaux précieux s'effectue moyennant un droit qui n'est pas forcément indexé sur la valeur des métaux. La majeure partie du traitement est donc conçue de façon à échantillonner et à doser le matériau de façon précise en vue de sa récupération. L'échantillonnage est réalisé après traitement physique du matériau ou à partir de flux annexes lors du traitement normal. Le secteur dispose de plus de 200 types de matières premières généralement caractérisées selon cinq types d'homogénéisation.

Catégorie d'homogénéisation	Type de matière première	Commentaire
Extrait	Catalyseurs, balayures préparées, solutions	Directement vers le procédé
Balayures	Minéraux + métal, catalyseurs au carbone non-fusibles	Incinération, grillage et pré-enrichissement
Déchets métalliques	Matériau fusible	
Matériaux à déchiqueter	Film, déchets métalliques électroniques	
Matériaux à dissoudre	Matériau dissous dans de l'acide, CN, NaOH, etc.	

Tableau 6.1 : Catégories d'homogénéisation utilisées pour l'échantillonnage

La caractérisation des matières premières est fondée sur l'entrée la plus appropriée où elles doivent intégrer le schéma de procédé (Fig. 6.1) et est indépendante des métaux précieux que contient le matériau. Les matières premières sont généralement échantillonnées suivant cette caractérisation, et les informations collectées indiquent que ce schéma est utilisé par la plupart des entreprises. Les échantillons sont traités pour dissoudre la fraction de métal précieux ou obtenir une forme analysable. Ce traitement implique

parfois tout ou partie du procédé de récupération lui-même ; il est alors nécessaire d'utiliser des systèmes de dépollution durant l'échantillonnage.

Schéma de procédé général relatif aux métaux précieux secondaires

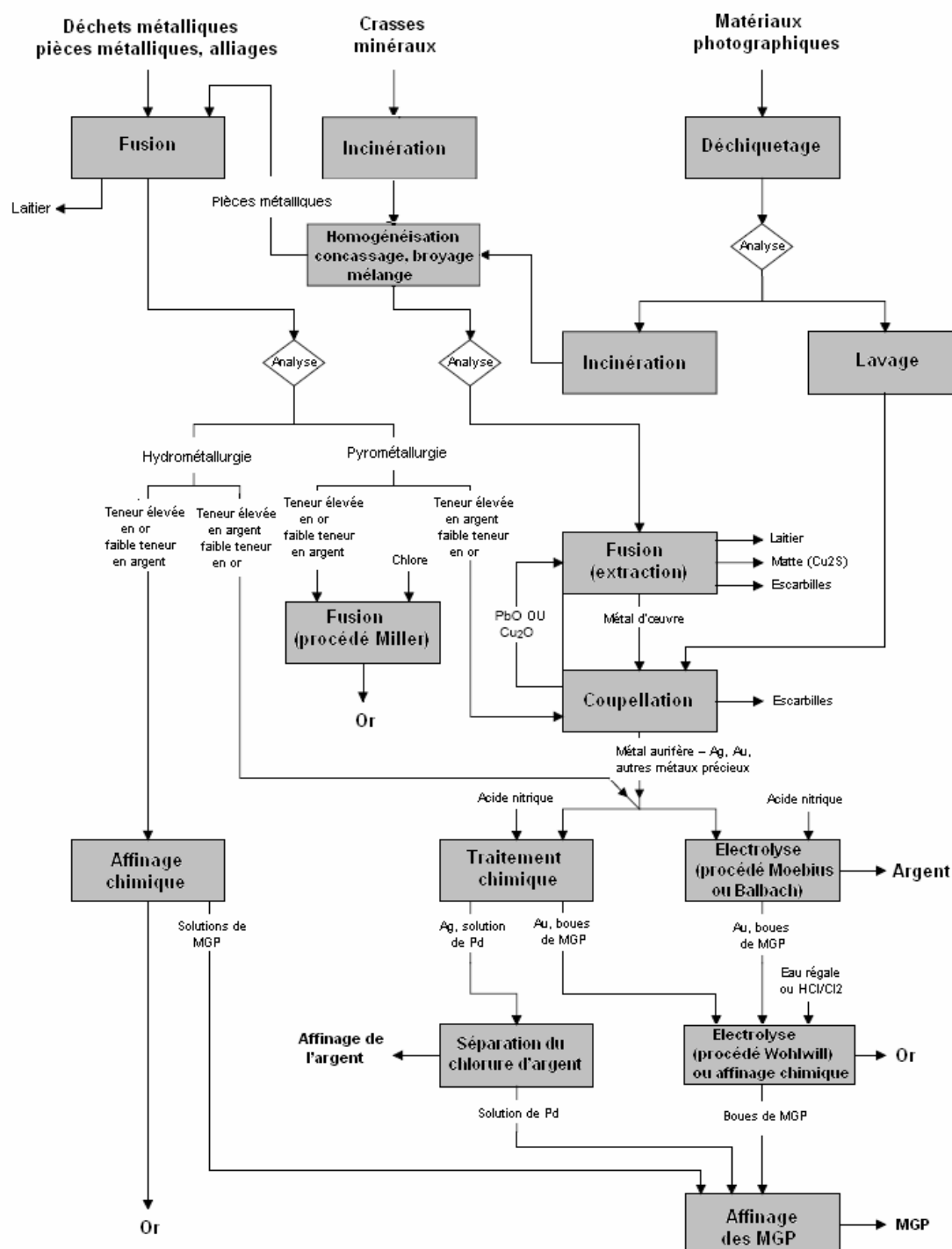


Figure 6.1 : Schéma de procédé général relatif à la récupération des métaux précieux [FIGURE : escarilles → poussières]

En outre, le traitement de ces matériaux doit s'effectuer rapidement, ce qui explique la surcapacité de production voulue par les acteurs du secteur. L'échantillonnage et l'analyse approfondis permettent également de faire le meilleur choix concernant les combinaisons de procédés à utiliser.

Les boues anodiques générées par l'affinage électrolytique du cuivre sont une source importante de métaux précieux ; elles sont traitées pour éliminer et récupérer les métaux précieux ainsi que d'autres, tels que le sélénium et le tellure. Le détail des procédés appliqués dépend de la proportion des métaux contenus dans les boues.

Le secteur dispose de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques ; il arrive également qu'une extraction par solvant soit réalisée. Le schéma suivant présente un exemple général.

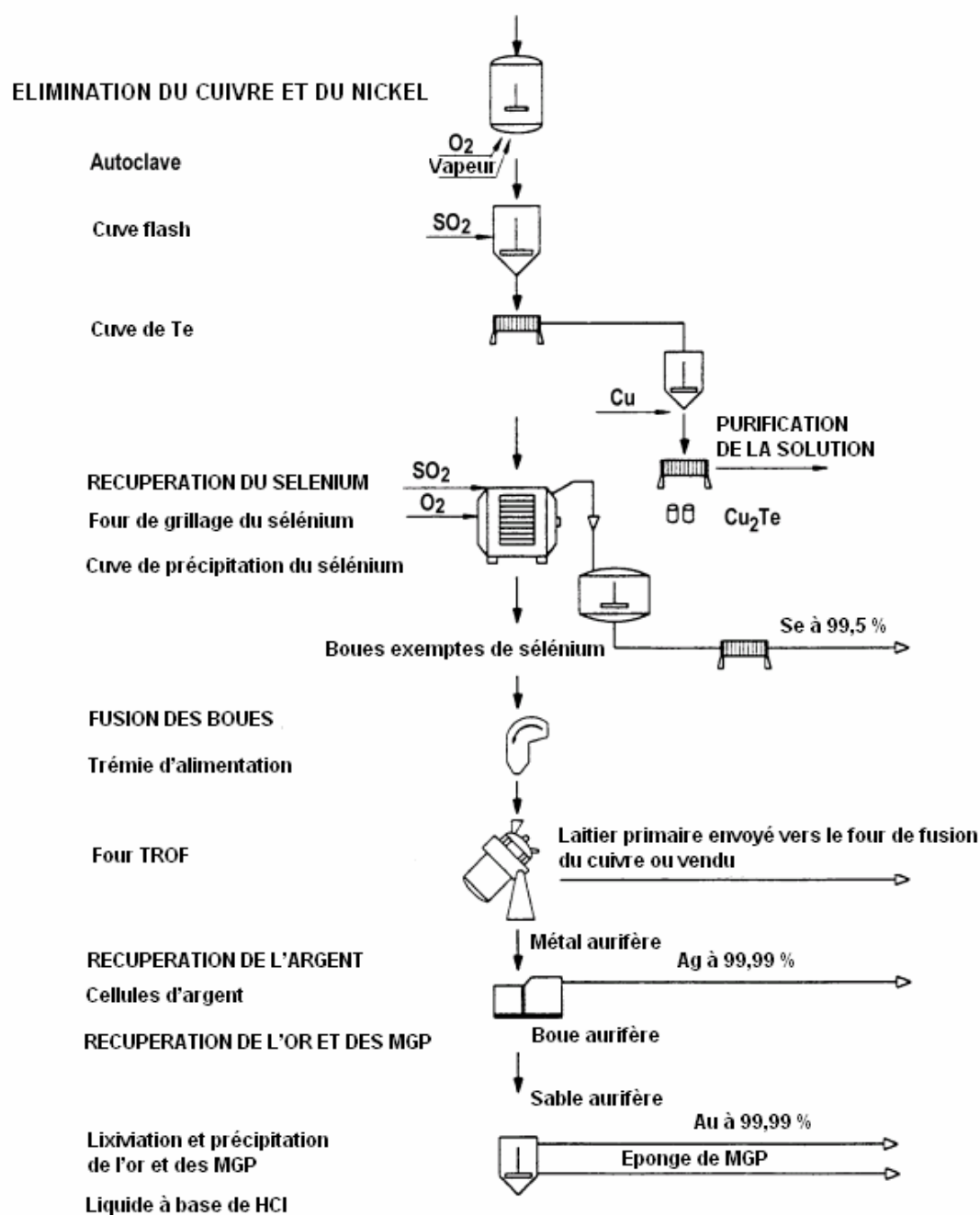


Figure 6.2 : Exemple de schéma de procédé relatif au traitement des boues anodiques [FIGURE : HCl + éponge de Pt]

6.1.1 Argent

Les principales sources d'argent sont les déchets métalliques (bijoux, pièces et autres alliages, par ex.), les concentrés, les boues anodiques (ou les boues des cellules électrolytiques), les films, le papier et les boues

photographiques, les cendres, les balayures, les boues et autres résidus [tm 5 & 19, HMIP PM 1993 ; tm 105, PM Expert Group 1998].

6.1.1.1 Matériaux photographiques

Le film, le papier et les boues photographiques sont incinérés par lots dans des fours à sole simple, ou par procédé continu dans des fours rotatifs afin d'obtenir des cendres riches en argent. Les unités de recyclage de taille réduite utilisent des fours à moufle. Le pouvoir calorifique de l'alimentation est tel que le combustible est nécessaire uniquement au cours du démarrage. Une chambre de post-combustion chauffée située dans une chambre séparée sert à brûler les produits partiellement brûlés contenus dans les effluents gazeux, ainsi que des systèmes de filtration et d'épuration utilisant un réactif basique. Les cendres sont récupérées puis traitées avec d'autres matériaux contenant de l'argent ; les gaz sont filtrés et les poussières collectées sont également traitées pour récupérer l'argent.

On utilise également un procédé de séparation chimique consistant à lixivier les sels d'argent présents dans la couche photographique. Ce procédé traite les films photographiques usagés à l'aide d'une solution de thiosulfate qui contient parfois des enzymes. L'argent présent dans la solution de lixiviation est récupéré par extraction électrolytique, et l'électrolyte appauvri est recyclé dans l'étape de lixiviation. En théorie, le support plastique peut également être récupéré ; le problème est que la matière alimentée comprend généralement une certaine quantité de papiers tels que des enveloppes, ce qui risque à la fois d'empêcher la récupération et de générer un nouveau flux de déchets [tm 5, HMIP PM 1993].

Pour récupérer l'argent contenu dans les solutions usagées provenant de l'industrie photographique et d'autres industries, on procède à une précipitation chimique formant du sulfure pour obtenir une poudre qui est ensuite séchée, fondue et affinée. Il est également possible d'utiliser des solutions de thiosulfate d'argent : celles-ci sont électrolysées à 2 V pour produire du sulfure d'argent insoluble (dans la pratique, on obtient 5 – 10 ppm d'argent en solution).

6.1.1.2 Cendres, balayures, etc.

Les cendres, les balayures, les plaques de circuits imprimés, les fines agglomérées, les boues et autres matériaux contenant du cuivre et des métaux précieux sont mélangés puis fondus dans divers types de fours (fours électriques, hauts fourneaux, fours rotatifs, fours à réverbères ou convertisseurs top blown rotary (TBRC)). On utilise du plomb ou du cuivre pour collecter l'argent et les autres métaux précieux. Le combustible employé est l'électricité, le coke, le gaz ou le pétrole ; il sert à générer une atmosphère réductrice. Dans certains cas, des déchets plastiques sélectionnés peuvent servir de combustibles ; on a alors recours à une étape de post-combustion adaptée pour empêcher toute émission de composés organiques tels que les COV ou les dioxines. On ajoute des fondants afin de collecter les constituants non-métalliques des matières chargées avant de les éliminer sous forme de laitier. A intervalles réguliers, on fait fonctionner le four avec une charge de laitier afin de récupérer les métaux précieux présents dans le laitier avant que celui-ci soit orienté vers une granulation ou la coulée puis vers une mise en décharge, un traitement ou utilisation.

L'argent et les autres métaux précieux produits dans le four de fusion sont collectés dans du plomb ou du cuivre fondu. L'alliage de plomb est transféré dans un fourneau de coupellation où le plomb est oxydé et transformé en litharge (oxyde de plomb) à l'aide d'air ou d'oxygène. L'alliage de cuivre subit le même type de traitement pour former de l'oxyde de cuivre [tm 105, PM Expert Group 1998].

Ces matériaux contenant des métaux précieux peuvent également être traités dans les fours de fusion utilisés pour les métaux communs. Les métaux précieux sont ensuite récupérés à partir des procédés de production du plomb, du cuivre ou du nickel.

6.1.1.3 Récupération des métaux précieux lors de la production de métaux communs

L'affinage électrolytique des anodes de cuivre produit des boues dont la composition dépend des matières chargées et des procédés mis en œuvre dans le four de fusion du cuivre. Les boues anodiques présentent généralement d'importantes quantités d'argent, d'or et de MGP ; elles sont vendues pour leur teneur en métaux précieux [tm 47 à 52, Outokumpu 1997] ou récupérées sur le site où s'effectue la fusion [tm 92 Copper Expert Group 1999].

Les procédés de traitement varient selon la composition des boues ; la figure 6.2 ci-dessus en fournit un exemple. Les étapes de procédé peuvent comprendre l'élimination du cuivre et du nickel (ainsi que de la majeure partie du tellure) par lixiviation acide (à la pression atmosphérique ou sous pression à l'aide de dioxygène), le grillage destiné à éliminer le sélénium, à moins que celui-ci ne soit éliminé au cours de la fusion par volatilisation. La fusion s'effectue à l'aide de fondants à base de silice et de carbonate de sodium afin de produire du métal aurifère dans des fours à réverbères, des fours électriques, des TBRC ou des fours à air enrichi soufflé par le fond (BBOC). Le métal aurifère (argent ou or) est du métal qui a été concentré sous une forme contenant plus de 60 % de métal [tm 105, PM Expert Group 1998]. Des étapes hydrométallurgiques et d'extraction par solvant sont aussi utilisées afin de récupérer les métaux précieux contenus dans les boues anodiques (procédés Kennecott et Phelps Dodge, par ex.).

Lors de la production hydrométallurgique de zinc, la fraction éventuelle de métaux précieux du concentré est enrichie dans les résidus de lixiviation Pb/Ag, qui peuvent subir un traitement supplémentaire dans un four de fusion du plomb. Au cours de la fusion et de l'affinage du plomb, les métaux précieux sont concentrés sous la forme d'un alliage Pb-Zn-Ag.

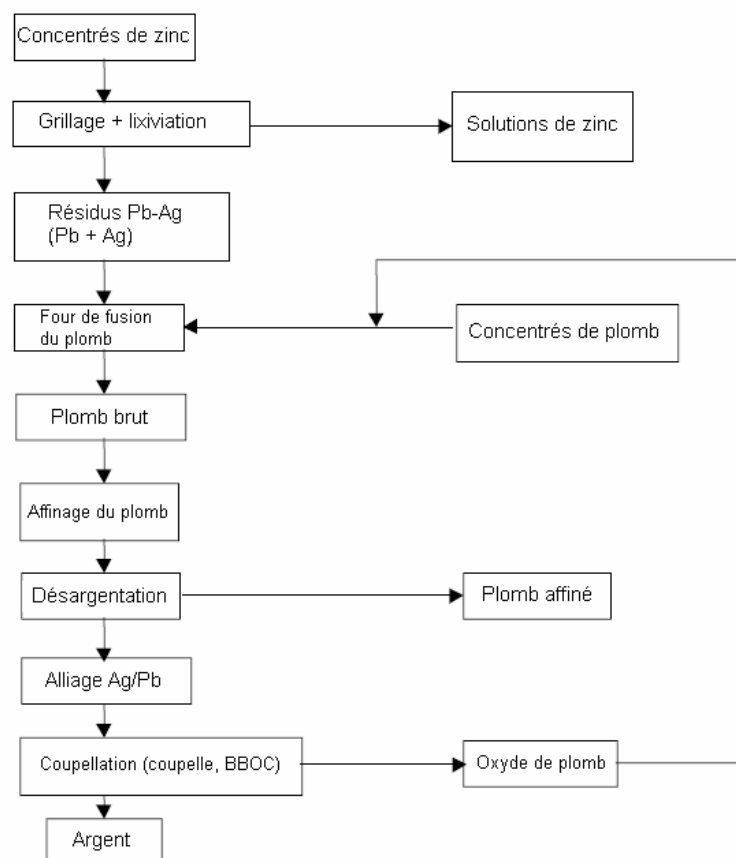


Figure 6.3 : Récupération de l'argent issu de la production de zinc et de plomb

Il est possible de procéder à une transformation supplémentaire consistant à éliminer la masse de plomb et de zinc par liquation et distillation sous vide, puis à effectuer une coupellation dans un four à réverbères, un TBRC, un four d'oxycombustion rotatif et inclinable (TROF), une coupelle ou un four à air enrichi soufflé par le fond (BBOC). Le plomb est oxydé sous forme de litharge (oxyde de plomb) à l'aide d'air et d'oxygène. Certaines installations équipées d'unités d'affinage du plomb et du zinc associent les phases enrichies en métaux précieux provenant des chaînes de production du plomb et du cuivre lors de l'étape de coupellation.

Lors de l'affinage du nickel, les métaux précieux sont récupérés à partir du sous-produit à base de cuivre. Lors de l'affinage du zinc, réalisé dans un four à cuve à plomb-zinc, les métaux précieux peuvent être récupérés dans le produit à base de plomb. L'or et les MGP sont également récupérés à partir de ces matériaux, le choix des procédés dépend de la proportion des métaux désirés et des autres métaux associés (sélénium, par ex.).

6.1.1.4 Affinage

L'affinage des anodes s'effectue dans des cellules électrolytiques de type Moebius ou Balbach-Thum au moyen de cathodes en titane ou en acier inoxydable baignant dans un électrolyte à base de nitrate d'argent acidifié. Un courant continu appliqué entre les électrodes entraîne la migration des ions argent dissous à partir de l'anode et le dépôt de ces ions sur les cathodes sous forme de cristaux d'argent. Ceux-ci sont séparés des cathodes en continu, éliminés des cellules, filtrés puis lavés. Les boues provenant des cellules électrolytiques sont traitées pour récupérer leur teneur en or et en MGP.

Les cristaux d'argent peuvent être fondus dans un four à creuset et coulés par lots en lingots commercialisables ou en grains qui seront aplanis au rouleau. Ils peuvent être coulés en continu en barres commercialisables qui seront aplanies au rouleau et transformées en tôle ou en feuillards. L'argent est également coulé en billettes transformées par filage en barres pleines ; celles-ci sont par la suite étirées sous forme de fils.

L'argent produit par fusion et les résidus à teneur élevée en argent issus des procédés de fabrication peuvent être affinés par dissolution dans de l'acide nitrique. La solution ainsi obtenue est purifiée soit par recristallisation sous forme de nitrate d'argent (utilisable dans le secteur de la photographie) soit par électrolyse, ce qui produit un argent fin qui peut être fondu et coulé en barres de métal d'œuvre.

6.1.2 Or

Les principales sources d'or sont constituées par l'or impur issu de l'exploitation minière, des procédés industriels, des bijoux, des balayures et des dents en or. Le métal est récupéré avec l'argent des boues anodiques provenant de l'affinage électrolytique du cuivre et d'autres matériaux au moyen des procédés décrits ci-dessus. Les déchets métalliques contiennent parfois d'importantes quantités de zinc, de cuivre et d'étain.

6.1.2.1 Procédé Miller

Le procédé Miller est utilisable pour le prétraitement des matériaux. Dans ce procédé, les matières alimentées sont fondues dans un creuset à chauffage indirect ou un four à induction électrique ; pendant la fusion, du chlore gazeux est injecté dans la charge fondue. Lorsque la température de fonctionnement atteint 1 000 °C, l'or est le seul métal à ne pas réagir pour former un chlorure fondu stable ou volatil. Le

chlorure d'argent fondu remonte vers la surface de la charge. Un fondant à base de borax facilite la collecte et l'écumage des chlorures métalliques. Le zinc présent dans les matières alimentées est converti en chlorure de zinc qui est évacué avec les chlorures métalliques volatils en direction d'un système d'épuration des gaz [tm 5, HMIP PM 1993 ; tm 105, PM Expert Group 1998].

Le procédé Miller permet d'obtenir soit de l'or à 98 % qui est coulé sous forme d'anodes destinées à l'affinage électrolytique, soit de l'or à 99,5 % qui est coulé en barres de métal d'œuvre.

6.1.2.2 Affinage électrolytique

Les anodes en or sont affinées dans des cellules Wohlwill contenant une feuille d'or ou des cathodes en titane. L'électrolyte utilisé est une solution de chlorure d'or acide maintenue à une température d'environ 70 °C. Un courant électrique continu appliqué entre les électrodes entraîne la migration des ions or dissous à partir des anodes et le dépôt de ces ions sur les cathodes, ce qui permet d'obtenir un produit contenant 99,99 % d'or.

6.1.2.3 Autres procédés

La récupération et l'affinage de l'or s'effectuent également en dissolvant les matières alimentées dans de l'eau régale ou dans de l'acide chlorhydrique/du chlore. Cette étape est suivie d'une précipitation de l'or à haut degré de pureté qui pourra être fondu puis coulé. Lorsque la matière alimentée contient d'importantes quantités d'impuretés métalliques, une étape d'extraction par solvant peut être réalisée avant la précipitation de l'or. Ces deux étapes peuvent également servir à récupérer l'or contenu dans les solutions issues de la production du platine.

L'or est en outre éliminé des solutions de cyanure solide et liquide (bains de dépôt, par ex.). Il est possible d'utiliser des solutions de cyanure de sodium ou de potassium pour éliminer l'argent des matériaux enduits (contacts électroniques, par ex.) ou métallisés. L'or est ensuite récupéré de ces solutions par électrolyse. Les cyanures réagissent avec les acides pour former du HCN ; il est donc nécessaire de veiller à ce que ces substances soient éloignées les unes des autres. Les cyanures sont détruits à l'aide d'agents oxydants tels que le peroxyde d'hydrogène ou l'hypochlorite de sodium, ou au moyen d'une hydrolyse à haute température.

6.1.3 Métaux du groupe platine

Les MGP comprennent le platine, le palladium, le rhodium, le ruthénium, l'iridium et l'osmium. Les matières premières sont principalement des concentrés obtenus à partir des minerais, des mattes et des boues provenant des opérations de transformation du nickel et du cuivre. Les matériaux secondaires tels que les produits chimiques et les catalyseurs d'échappement des voitures usagés, ainsi que les déchets métalliques électroniques et électriques constituent également d'importantes sources de MGP. Ceux-ci peuvent être présents dans les boues anodiques décrites ci-dessus ; ils sont séparés de l'or et de l'argent par une série de procédés hydrométallurgiques. Une charge de qualité médiocre peut être concassée puis mélangée, tandis que les matières alimentées métalliques sont généralement fondues pour fournir un produit homogène qui sera échantillonné.

Les principales étapes de récupération des MGP sont les suivantes [tm 5 & 19, HMIP PM 1993 ; tm 105, PM Expert Group 1998] :

- prétraitement de la charge, échantillonnage et dosage ;
- dissolution, séparation et purification des MGP (par précipitation, extraction liquide/liquide ou distillation des tétraoxydes, par ex.) ;

- récupération du platine, du palladium, du rhodium et de l'iridium (par réduction à l'hydrogène, extraction liquide/liquide ou procédés électrolytiques, par ex.) ;
- affinage des MGP au moyen de techniques hydro-métallurgiques, telles que : utilisation de composés ammonium-chlore pour produire, par pyrolyse, une éponge de métal pur.

Des procédés spécifiques ont été développés pour traiter les catalyseurs à base de carbone ; ces derniers sont généralement incinérés avant l'étape de dissolution. Les catalyseurs à base de poudre et les boues sont traités par lots, souvent dans des fours à moufle. Le chauffage à flamme directe permet de sécher puis d'enflammer le catalyseur que l'on laisse ensuite se consumer naturellement. L'arrivée d'air dans le four est régulée afin de modifier les conditions de combustion, et on a recours à une chambre de post-combustion.

Les catalyseurs de reformage ou d'hydrogénation peuvent être traités en dissolvant la base céramique dans de l'hydroxyde de sodium ou de l'acide sulfurique. Avant la lixiviation, l'excès de carbone et d'hydrocarbures est éliminé par combustion. Les MGP provenant des catalyseurs de voitures peuvent être collectés séparément dans du cuivre ou du nickel au moyen de fours à plasma, de fours électriques ou de convertisseurs [tm 105, PM Expert Group 1998]. Les unités de traitement de taille réduite utilisent des plateaux ouverts pour éliminer les catalyseurs par auto-combustion ou grillage. Ces procédés présentent des risques ; les fumées et les gaz dégagés peuvent être traités par collecte et post-combustion.

L'affinage des MGP est complexe. Il peut être nécessaire de répéter certaines étapes du procédé si l'on souhaite obtenir la pureté requise. Le nombre et l'ordre des étapes dépendent également des contaminants à éliminer et du mélange spécifique de MGP à séparer de chaque lot de charge. La transformation des matériaux secondaires, tels que les produits chimiques usagés et les catalyseurs de voitures, ainsi que les déchets métalliques électriques et électroniques dans les fours de fusion utilisés pour les métaux communs ou d'autres équipements spécifiques, permet d'obtenir au final des résidus ou des précipités riches en MGP.

6.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les unités d'affinage des métaux précieux sont des réseaux complexes de procédés principaux et annexes. Les matières premières utilisées présentent des différences considérables en termes de qualité et de quantité ; les équipements employés offrent donc un large panel de capacités et d'utilisations possibles. Les réacteurs et les fours polyvalents sont couramment utilisés et les étapes de traitement sont souvent répétées. Il est donc impossible d'identifier des étapes uniques et de déterminer leur poids respectif dans les niveaux d'émissions et de consommations.

Un certain nombre de principes généraux régissent les émissions et les consommations caractéristiques de ce secteur :

- En moyenne, le rapport entre la quantité de métaux précieux isolés et la quantité de matériaux à traiter au préalable est de 1/10. Les concentrations sont comprises entre < 1 % et des métaux presque purs ;
- Les techniques appliquées consomment beaucoup d'énergie (four électriques, par ex.). L'énergie est récupérée lorsque les conditions le permettent ;
- Les résidus contenant des métaux communs sont vendus en vue de la récupération de ces métaux ;
- De nombreux traitements chimiques reposent sur l'utilisation de cyanure, de chlore, d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique. Ces réactifs sont réintroduits dans les procédés mais doivent, au final, être oxydés ou neutralisés à l'aide de soude caustique et de chaux. Les boues provenant du traitement des eaux usées subissent une analyse approfondie visant à détecter la présence éventuelle de métaux et sont, si possible, récupérées ;
- L'extraction liquide/liquide fait appel à toute une gamme de solvants organiques ;
- De nombreux agents oxydants et réducteurs sont utilisés ;
- Les gaz acides tels que le chlore ou les oxydes d'azote sont récupérés pour être réutilisés ;
- Les volumes de gaz émis présentent des écarts considérables d'un cycle à l'autre. La taille réduite des procédés permet généralement un confinement efficace. Des ventilateurs d'extraction sont mis en place à certains endroits.

6.2.1 Circuits de matériaux dans le secteur du recyclage des métaux précieux

L'une des caractéristiques du secteur des métaux précieux est la nécessité de minimiser les volumes de solutions afin de réduire les pertes de métaux précieux ou de leurs composés. En conséquence, il existe plusieurs cycles fermés en fonctionnement pour récupérer les matériaux et ceux-ci sont décrits ci-dessous.

6.2.1.1 Cycles des substances non-métalliques

L'acide chlorhydrique et l'acide nitrique sont principalement utilisés pour dissoudre les métaux. L'acide sulfurique sert, dans une moindre mesure, de constituant des solutions d'épuration pour l'absorption de l'ammoniac et pour l'électrolyte dans les bains de poudre d'argent. D'autres substances sont utilisées comme réactifs ou sont présentes dans les matières alimentées.

a) Circuit de l'acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique (HCl) s'utilise lors des opérations de dissolution, où il est associé à un excès de chlore. Par évaporation et collecte dans l'eau, on obtient un acide azéotrope (à des concentrations proches de 20 % poids/poids) utilisable à différents stades du processus d'affinage.

b) Circuit de l'acide nitrique

L'argent et le palladium sont souvent dissous dans de l'acide nitrique (HNO_3). Une quantité importante d'effluents gazeux riches en oxyde d'azote (NO et NO_2) peut être captée à l'aide d'oxygène ou de peroxyde d'hydrogène si l'on utilise un système d'épuration en cascade spécial. Le long temps de séjour nécessaire à l'oxydation de faibles quantités de NO et la réduction de l'absorption des gaz induite par des réactions exothermes peuvent être problématiques. Il faut donc procéder à un refroidissement des gaz et combiner différents épurateurs pour atteindre les valeurs-limites et éviter que des fumées rousses ne soient émises par les cheminées. L'acide nitrique provenant du premier épurateur présente généralement une concentration proche de 45 % en poids et peut être réutilisé dans plusieurs procédés.

c) Circuit du chlore

Le chlore est utilisé dans les procédés par voie humide pour dissoudre les métaux et dans les étapes de chloruration à sec à haute température pour affiner les métaux. Il s'agit dans les deux cas de circuits fermés (utilisation de tubes en U remplis d'eau pour produire des solutions d'hypochlorite, par ex.). L'hypochlorite sert également d'agent oxydant dans des solutions d'épuration utilisées dans le cadre de différents procédés.

d) Circuit du chlorure d'ammonium

L'ammoniac et le chlorure d'ammonium servent à récupérer les MGP. La solubilité relativement limitée du chlorure d'ammonium (NH_4Cl) dans des solutions évaporées à température ambiante permet de réutiliser les précipités cristallins de ce sel.

e) Circuit de l'alumine

D'importantes quantités de catalyseurs hétérogènes à base d'alumine (Al_2O_3) sont traitées dans les unités d'affinage des métaux précieux (catalyseurs de reformage issus des raffineries de pétrole, par ex.). Les catalyseurs sont dissous dans de la soude caustique sous pression à une température supérieure à 200 °C, et la solution d'aluminate ainsi obtenue est vendue après que les métaux précieux ont été séparés, en tant que 'adjuvant de précipitation lors du traitement de l'eau. Une autre voie consiste à la renvoyer vers le secteur de l'alumine utilisant le procédé BAYER (dissolution de la bauxite). Il est possible de mettre en œuvre des cycles externes de ce type avec les solutions de sulfate d'aluminium, obtenues par dissolution des catalyseurs dans de l'acide sulfurique.

6.2.1.2 Cycles des métaux non-précieux

Les unités d'affinage des métaux non-précieux transforment d'importantes quantités de matériaux contenant du cuivre, du plomb, de l'étain, du tungstène, du rhénium, du cadmium, du mercure et d'autres métaux particuliers. Des procédés spéciaux ont été mis au point pour effectuer la séparation de tous ces métaux ; les produits obtenus sont des concentrés qui seront envoyés vers des usines métallurgiques externes destinées aux métaux non-précieux.

a) Cuivre

L'utilisation du cuivre comme matériau de support des métaux précieux est en plein essor. Les procédés de fusion appliqués dans ce cas entraînent la formation de résidus sous la forme d'oxydes de cuivre. Les procédés hydrométallurgiques permettent de précipiter le cuivre à l'aide de soude caustique (NaOH) et/ou de chaux (oxyde de calcium ou CaO). Les résidus de cuivre peuvent être récupérés dans une unité d'affinage de cuivre ou convertis en sulfate et extraits par électrolyse si le volume de métal est suffisant.

Pour éliminer les traces de cuivre, notamment en présence de chélates tels que l'ammoniac, celles-ci doivent être précipitées au moyen de sulfures ou de composés mercapto non toxiques (TMT 15 par ex., une solution à 15 % de tri-mercapto-triazine).

b) Plomb

Les cycles du plomb sont connus depuis le Moyen-âge dans le domaine de l'affinage de l'argent. Ce procédé est encore utilisé pour l'extraction des balayures. Le plomb liquide constitue un solvant efficace pour les métaux précieux, notamment en présence d'un excès d'argent. Le plomb enrichi en métaux précieux est oxydé avec de l'oxygène dans des fours ou des convertisseurs, effectuant la séparation du plomb et des autres métaux non-précieux de façon presque quantitative. Les oxydes ainsi obtenus sont réduits par du carbone (dans un haut fourneau, par ex.), ce qui permet de produire du plomb qui sera réutilisé dans le procédé. L'excès de plomb est vendu à des unités d'affinage.

c) Étain

La séparation de l'étain s'effectue sous forme de métal en solution ou sous forme de précipité d'hydroxyde d'étain.

d) Tungstène et autres métaux

Dans le cas de certains métaux issus des procédés de galvanisation, les métaux communs tels que les alliages de nickel, le tungstène ou le molybdène peuvent être recyclés par séparation au cyanure.

e) Rhénium

Pour le rhénium, on a recours à des échangeurs d'ions. Après purification et précipitation du rhénium sous forme de sel d'ammonium (NH_4ReO_4), le produit est utilisé dans les unités d'affinage des métaux précieux.

f) Cadmium

La concentration de cadmium des alliages spéciaux, tels que les métaux d'apport de soudage ou de brasage, a diminué ces dernières années. Le cadmium est enrichi dans les poussières des effluents gazeux provenant de campagnes spéciales puis envoyé vers des usines métallurgiques externes.

g) Mercure

A de faibles concentrations, le mercure peut faire partie intégrante de certains matériaux spécifiques tels que les amalgames dentaires, les poudres ou les boues, les résidus des usines de fabrication des batteries ou encore certains types de films Polaroid. Pour ce type de matériau, la première étape de récupération consiste à effectuer une distillation à haute température, éventuellement associée à une dépression légère. Les concentrations moyennes des déchets et des balayures distillées sont inférieures à 0,1 % poids/poids par rapport aux concentrations-limites du mercure.

Ces différents circuits et la séparation des composés métalliques non-précieux contribuent à éviter des contaminations et optimiser la rentabilité des installations.

6.2.2 Émissions dans l'air

Voici les principales émissions dans l'air liées à la production des métaux précieux :

- dioxyde de soufre (SO_2) et autres gaz acides (HCl),
- oxydes d'azote (NO_x) et autres composés azotés,
- métaux et composés métalliques,
- poussières,
- chlore,
- ammoniac et chlorure d'ammonium,

- COV et dioxines.

Le tableau suivant illustre la répartition des différentes substances émises en fonction des principales sources de pollution.

Constituant	Incinération ou fusion	Lixiviation et purification	Électrolyse	Extraction par solvant	Distillation
Dioxyde de soufre et HCl	••	•	•		
COV	•	•••		•••	•••
Dioxines	••				
Chlore		•••	••		
Oxydes d'azote	••	••			
Poussières et métaux	•••*	•	•	•	•
Note : ••• Plus important • moins important Les sources présentées ci-dessus peuvent également être à l'origine d'émissions fugitives ou non-captées.					

Tableau 6.2 : Importance des émissions dans l'air potentielles issues de la production des métaux précieux

Parmi les différents procédés appliqués, les principales sources d'émissions sont les suivantes :

- Incinération,
- autres prétraitements,
- four de fusion et de fonte,
- lixiviation et purification,
- extraction par solvant,
- électrolyse,
- étape finale de récupération et de transformation.

Production [t]	Kg de poussières / t de métal	Kg d'oxydes d'azote / t de métal	Kg de dioxyde de soufre / t de métal
2 155	58	154	232
1 200	4,5	68	3,1
2 500	2	7	9
1 110	18		
102	127	21	

Tableau 6.3 : Émissions dans l'air associées à un panel de procédés de grande capacité

6.2.2.1 Poussières et métaux

En règle générale, les poussières et les métaux peuvent être émis par des incinérateurs, des fours et des coupelles sous forme d'émissions fugitives ou d'émissions captées et dépolluées. La mise en étanchéité des fours et l'utilisation de systèmes de collecte secondaires des fumées provenant des goulottes de coulée sont des mesures importantes de prévention des émissions fugitives. Certains fours électriques effectuent les ajouts de matériaux à l'aide d'électrodes creuses afin d'optimiser l'étanchéité des fours. Les cendres en provenance des incinérateurs sont généralement trempées et la réduction des émissions fugitives passe

obligatoirement par la maintenance du joint hydraulique. Les incinérateurs fonctionnant en discontinu équipés de plateaux et de boîtes ouvert(e)s posent des problèmes en termes de confinement des poussières et des cendres. Les émissions collectées sont généralement traitées dans des filtres céramique ou à manches, dans des filtres électrostatiques ou des épurateurs par voie humide [tm 164, Bobeth 1999].

6.2.2.2 Dioxyde de soufre

Ces gaz sont formés par la combustion du soufre contenu dans les matières premières ou dans le combustible, ou lors des étapes de digestion acide. La régulation de la charge peut permettre de minimiser les émissions ; si la concentration le justifie, on utilise des épurateurs par voie humide ou semi-sèche. L'extraction électrolytique peut générer des brouillards et des gaz au niveau des électrodes. Les gaz peuvent être collectés puis réutilisés, tandis que l'utilisation de dévésiculeurs permet d'éliminer les brouillards et de les renvoyer dans le procédé.

6.2.2.3 Chlore et HCl

Ces gaz peuvent être formés au cours d'un certain nombre de procédés de digestion, d'électrolyse et de purification. Le chlore est beaucoup utilisé dans le procédé Miller et dans les étapes de dissolution utilisant des mélanges d'acide chlorhydrique et de chlore. Dans la mesure du possible, ce dernier est récupéré et réutilisé (utilisation de cellules électrolytiques hermétiques pour l'or et les métaux précieux, par ex.). Les épurateurs servent à éliminer les quantités résiduelles de chlore et de HCl.

La présence de chlore dans les eaux usées peut entraîner la formation de composés organiques chlorés, si des solvants ou d'autres substances de ce type sont également présents dans les eaux usées mélangées.

6.2.2.4 Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote sont produits dans une certaine mesure au cours de la combustion mais aussi, en grandes quantités, lors de la digestion acide réalisée avec de l'acide nitrique. Les concentrations élevées d'oxydes d'azote sont traitées dans des épurateurs de façon à pouvoir récupérer l'acide nitrique. On utilise différents agents oxydants pour induire la conversion et permettre la récupération de l'acide nitrique.

Les oxydes d'azote résiduels présents dans les effluents gazeux des fours peuvent être éliminés à l'aide de procédés catalytiques tels que la catalyse sélective ou non-sélective dans le cas de concentrations de NO_x très élevées en continu [tm 164, Bobeth 1999].

Le choix des techniques de dépollution dépend principalement des variations de la concentration des NO_x .

6.2.2.5 COV et dioxines

Les COV peuvent être émis par les procédés d'extraction par solvant. Compte tenu de la taille réduite des procédés, il est généralement possible d'opter pour des réacteurs hermétiques ou en enceinte fermée et d'utiliser des condenseurs pour assurer une collecte et une récupération performantes. Les solvants collectés sont réutilisés.

Parmi les composés carbonés organiques qui peuvent être émis lors des étapes de fusion figurent les dioxines, dues à la mauvaise combustion des huiles et des plastiques contenus dans les matières alimentées, ou à une synthèse de novo si le refroidissement des gaz n'est pas assez rapide. Il est possible de traiter les déchets métalliques pour éliminer les contaminants organiques ; en règle générale, on utilise plutôt des chambres de post-combustion pour traiter les gaz émis, qui sont ensuite refroidis rapidement. Lorsqu'il n'est pas possible de traiter les gaz des fours par post-combustion, ces gaz peuvent être oxydés en injectant de l'oxygène au dessus de la zone de fusion. On peut également déterminer la nature des

contaminants organiques présents dans les matières premières secondaires afin d'utiliser la combinaison de fours et de systèmes de dépollution la plus adaptée et d'empêcher les émissions de fumées et des dioxines associées. Les composés organiques, y compris les dioxines, peuvent être décomposés par oxydation catalytique, souvent effectuée dans des réacteurs hermétiques.

	Procédés d'incinération	Procédés pyrométallurgiques	Procédés hydrométallurgiques
Fourchette de production	200 – 1 000 kg/j	150 – 1 200 t/a	20 – 600 t/a
Poussières [mg/Nm ³]	2 - 10	4 - 10	
Oxydes d'azote [mg/Nm ³]	50 - 150	~ 200	1 - 370
Dioxyde de soufre [mg/Nm ³]	1 - 25	10 - 100	0,1 – 35
Monoxyde de carbone [mg/Nm ³]	10 - 50	80 - 100	
Chlorure [mg/Nm ³]	2 - 5	< 30	0,4 – 5
Cl ₂ [mg/Nm ³]		< 5	2 - 5
Fluorure [mg/Nm ³]	0,03 – 1,5	2 - 4	
COT [mg/Nm ³]	2 - 5	2 - 20	
Dioxines [ng iTE/Nm ³]	< 0,1	< 0,1	
HCN [mg/Nm ³]			0,01 – 2
NH ₃ [mg/Nm ³]			0,2 - 4

Tableau 6.4 : Émissions dans l'air associées à un panel de procédés de faible capacité

[tm 164, Bobeth 1999]

6.2.3 Émissions dans l'eau

Les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques consomment beaucoup d'eau de refroidissement. Les solutions résultant des cycles de lixiviation sont normalement réinjectées dans des systèmes hermétiques. Le tableau ci-dessous présente d'autres sources d'eau de traitement, qui contribuent parfois à l'émission dans l'eau de matières solides en suspension, de composés métalliques et d'huiles.

L'intégralité du volume d'eaux usées est traitée pour éliminer les métaux et des matières solides dissous. On procède à la précipitation des ions métalliques sous forme d'hydroxydes ou de sulfures, ou encore à une précipitation en deux étapes. La technique de l'échange d'ions est adaptée en présence de faibles concentrations et quantités d'ions métalliques. Certaines installations réutilisent ou recyclent l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées (y compris les eaux de pluie).

Des techniques spécialement conçues pour les procédés de production des métaux précieux permettent de rendre inertes les nitrites (réduction) et les cyanures (hydrolyse) présents dans les eaux usées [tm 164, Bobeth 1999].

Source d'émissions	Matières solides en suspension	Composés métalliques	Huile
Drainage de surface
Eau de refroidissement – refroidissement direct
Eau de refroidissement – refroidissement indirect	.	.	
Eau de trempe	
Lixiviation (lorsqu'elle n'est pas effectuée en circuit fermé)
Extraction électrolytique (lorsqu'elle n'est pas effectuée en circuit fermé)		...	
Systèmes d'épuration	

Note : *** Plus important.....* moins important

Tableau 6.5 : Importance des émissions potentielles dans l'eau issues de la production des métaux précieux

Production [t/a]	Effluent [m ³ /h]	Principaux constituants [mg/l]					
		As	Pb	Hg	Cu	Ni	DCO
2 155	10	0,1	0,5	0,05	0,3	0,5	400
1 200	2		< 1	< 0,05	< 2	< 5	
2 500	100	0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,3	< 0,02	250
1 110			3,9 kg/a	0,05 kg/a	194 kg/a	24 kg/a	
102			1 260 kg/a		2 750 kg/a	1 640 kg/a	

Tableau 6.6 : Émissions dans l'eau provenant de 5 procédés de grande capacité

Parmi les autres émissions potentielles dans l'eau figurent les ions ammonium, chlorure et cyanure, en fonction de chaque étape de traitement. On ne dispose d'aucune donnée chiffrée permettant de quantifier ces constituants.

6.2.4 Résidus et déchets issus des procédés

La production des métaux s'accompagne de la formation de différents types de sous-produits, résidus et déchets également énumérés dans le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil 94/3/CE). Les principaux résidus spécifiques aux procédés sont présentés ci-dessous. La plupart d'entre eux sont recyclés dans le procédé ou envoyés vers d'autres unités spécialisées où seront récupérés les métaux précieux, le cas échéant. Les résidus contenant d'autres métaux, tels que du cuivre, sont vendus à d'autres producteurs qui les récupéreront. Les résidus finaux comprennent généralement les gâteaux de filtration à base d'hydroxydes.

Volume de déchets à éliminer chaque année [t]	Type de déchet
1 000	Hydroxyde de fer, 60 % d'eau (déchet industriel de catégorie 1)
1 000	Gâteau de filtration des effluents
350	Gâteau de filtration des effluents

Tableau 6.7 : Exemples de volumes de déchets

6.2.5 Utilisation de l'énergie

L'énergie résiduelle des procédés d'incinération peut être utilisée de différentes manières en fonction des conditions spécifiques à chaque site. La production d'électricité est possible si au moins 0,5 MW/h peuvent être produits.

6.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation énergétique dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et de les procédés associés. Certaines techniques utilisées dans d'autres secteurs, notamment celles relatives à la collecte, à la réutilisation et à l'épuration des solvants organiques, des oxydes d'azote et au chlore gazeux, sont également applicables aux métaux précieux.

Il faut également prendre en compte la mise en place de hottes lors des opérations de vidange et de coulée. Les fumées produites sont principalement constituées d'oxydes des métaux impliqués lors de la fusion. Le système de capotage doit être conçu de façon à tenir compte des accès pour le chargement et les autres opérations effectuées au niveau du four, et à tenir compte de la façon dont les sources de gaz de procédé évoluent au cours d'un cycle de production.

Les procédés décrits ci-dessus s'appliquent à un large panel de matières premières dont les quantités et la composition varient ; ils sont aussi représentatifs des procédés utilisés dans le monde entier. Les techniques ont été mises au point par les entreprises du secteur afin de tenir compte de ces variations. Le choix entre un procédé pyrométallurgique et un procédé hydrométallurgique dépend des matières premières utilisées, de leur quantité, des impuretés qu'elles contiennent, des produits fabriqués et du coût des opérations de recyclage et de purification. Ces facteurs sont donc spécifiques à chaque site. Les procédés de récupération de base présentés ci-dessus sont donc les techniques à prendre en compte en tant que procédés de récupération.

6.3.1 Manutention des matières premières

Le stockage des matières premières dépend de la nature du matériau décrit ci-dessus. Dans le cas de poussières fines, on a recours à des bâtiments clos ou à un conditionnement hermétique. Les matières premières secondaires qui contiennent des composés hydrosolubles sont stockées sous abri. Le stockage des matériaux non-pulvérulents et non-solubles (à l'exception des batteries) peut s'effectuer dans des tas à ciel ouvert ; les éléments volumineux peuvent être stockés individuellement à ciel ouvert. Les substances inflammables et réactives doivent être stockées de façon séparée, en veillant à tenir éloignés les matériaux susceptibles de réagir l'un avec l'autre.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaire
Charbon ou coke	À l'air libre avec sol étanche et collecte de l'eau, travées couvertes, silos	Convoyeurs couverts (matériaux non-pulvérulents) ; manutention pneumatique		
Combustibles	Réservoirs ou fûts en enceinte fermée	Pipeline sécurisé ou système manuel		
Fondants	En enceinte fermée, silo (en cas de formation de poussières)	Convoyeurs fermés avec collecte des poussières ; manutention pneumatique	Mélangés à des concentrés ou à d'autres matériaux	
Concentrés	En enceinte fermée, fûts, sacs (en cas de formation de poussières)	En enceinte fermée avec collecte des poussières. Convoyeur fermé ou manutention pneumatique	Mélangés à l'aide de convoyeurs ; séchage ou frittage	
Circuits imprimés	Travées couvertes, boîtes	Selon la nature du matériau	Broyage + séparation par densité, incinération	La fraction plastique peut fournir de l'énergie
Poussières fines	En enceinte fermée (en cas de formation de poussières)	En enceinte fermée avec collecte des poussières ; manutention pneumatique	Mélangées, agglomérées (pelletisation)	
Poussières grossières (matière première ou laitier granulé)	Travées couvertes	Chargeuse mécanique	Grillage pour éliminer les COV	Collecte des huiles si nécessaire
Films, catalyseurs, balayures	Fûts, gros sacs, balles	Selon la nature du matériau	Incinération, grillage	
Matériaux métallisés	Fûts, boîtes	Selon la nature du matériau	Séparation au cyanure ou à l'acide nitrique	
Grosses pièces (matière première ou laitier)	Stockage à ciel ouvert	Selon la nature du matériau		Collecte des huiles si nécessaire
Éléments entiers	À ciel ouvert ou dans des travées couvertes	Selon la nature du matériau	Meulage et broyage	Collecte des huiles si nécessaire
Matériaux réactifs	Stockage séparé	Selon la nature du matériau	Concassés ou alimentés entiers	Collecte de l'acide
Acides : - effluent acide - acide récupéré	Réservoirs résistants aux acides Réservoirs résistants aux acides		Vendu ou neutralisé Vendu	
Produits : cathodes, billettes et lingots ; barre et fil	Zone bétonnée ouverte ou stockage couvert			
Résidus de procédé à récupérer	Stockage couvert ou en enceinte fermée selon le risque de formation de poussières	Dépend des conditions		Système de drainage approprié
Déchets pour mise en décharge	Travées couvertes ou fermées, gros sacs ou fûts hermétiques, selon la nature du matériau	Dépend des conditions		Système de drainage approprié

Tableau 6.8 : Manutention et prétraitement des matériaux

6.3.2 Procédés de production des métaux

Comme cela a été indiqué précédemment, il existe de nombreuses techniques et combinaisons de techniques possibles permettant de récupérer les métaux précieux. La combinaison retenue dépend des matières premières et de la matrice qui contient les métaux. Le tableau ci-dessous présente les étapes de procédé courantes, les difficultés associées à chacune, ainsi que les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

Procédé	Problème éventuel	Techniques à prendre en compte	Commentaire
Incinération	Poussières, COV, dioxines, SO ₂ , NO _x	Régulation du procédé, post-combustion et filtre à manches	Four rotatif (sauf procédé de très petite taille)
Concassage, mélange ou séchage	Poussières	Confinement, collecte des gaz et filtre à manches	
Pelletisation	Poussières	Confinement, collecte des gaz et filtre à manches	
Fusion et élimination/volatilisation du sélénium	Poussières, métaux, COV, NO _x et SO ₂	Confinement, collecte des gaz et élimination des poussières ; épurateur	Épurateur ou électrofiltre par voie humide pour récupérer le sélénium
Couplation	Oxyde de plomb	Confinement, collecte des gaz et filtre à manches	Utilisation de la filière du cuivre
Digestion acide	Gaz acides Déversement d'acide	Confinement, collecte des gaz et système de récupération / épuration	Voir également le Tableau 6.11
Affinage	Gaz acides, NH ₃ Déversement d'acide	Confinement, collecte des gaz et filtre à manches	Voir également le Tableau 6.11
Oxydation et réduction	Composés chimiques Déversement de produits chimiques	Confinement, collecte des gaz et épuration / traitement	Voir également le Tableau 6.11
Fusion, préparation des alliages et coulée	Poussières et métaux	Confinement, collecte des gaz et filtre à manches	
Extraction par solvant	COV	Confinement, collecte des gaz et récupération / absorption	Voir également le Tableau 6.11
Dissolution	HCl, Cl ₂ , NO _x	Confinement, collecte des gaz et système de récupération / épuration	Voir également le Tableau 6.11
Distillation		Confinement, collecte des gaz et système de récupération / épuration	Voir également le Tableau 6.11

Tableau 6.9 : Techniques à prendre en compte pour les différentes étapes de production des métaux

EXEMPLE 6.01 INCINERATION DES MATERIAUX PHOTOGRAPHIQUES

Description : Utilisation d'un four rotatif associé à des systèmes performant de régulation de procédé, de collecte et de traitement des gaz. La régulation de la rotation et du procédé permettent d'obtenir un mélange homogène de matériau et d'air.

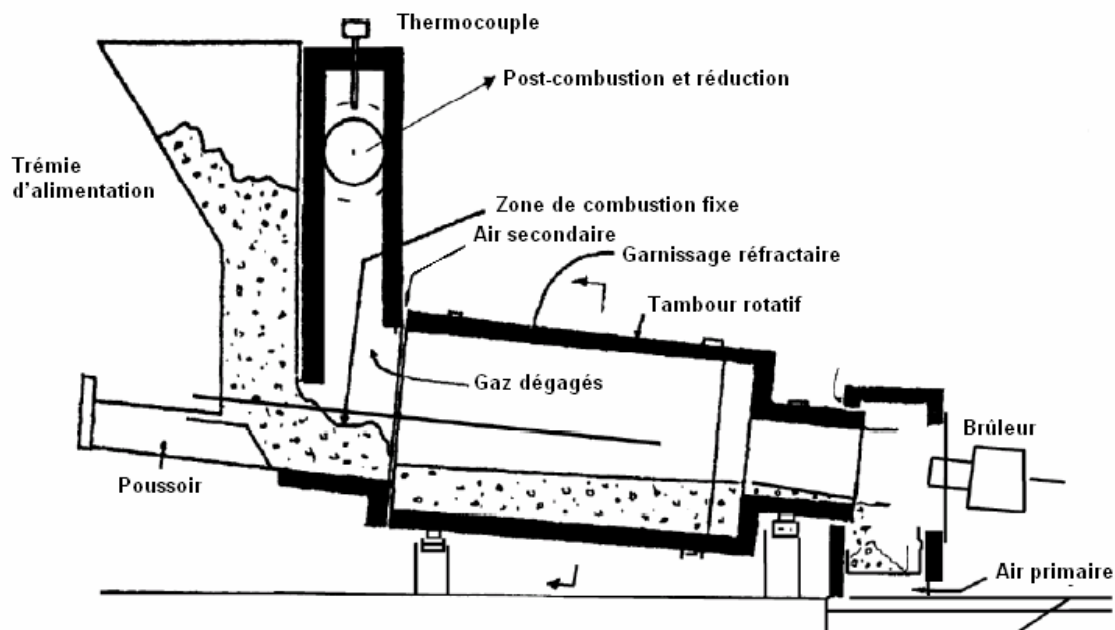


Figure 6.4 : Incinérateur utilisé pour les films photographiques

Principaux bénéfices environnementaux : Simplification de la collecte des fumées, de la post-combustion et du traitement des gaz par rapport aux incinérateurs statiques ou à moufle.

Données opérationnelles : Données non disponibles

Effets croisés : Effet positif : efficacité de collecte élevée et consommation énergétique réduite par rapport à d'autres systèmes de ce type (utilisation du pouvoir calorifique du film).

Aspects économiques : Coûts d'investissement estimés à 450 000 £ pour une capacité de 500 kg/h (données de 1988).

Applicabilité : Incinération de tous matériaux photographiques

Exploitations de référence : RU

Documents de référence : [tm 005, HMIP 1993] ; [tm 106, Farrell 1998]

Four	Procédé utilisé	Avantages	Inconvénients
Haut fourneau	Fusion	A fait la preuve de son efficacité	Le système de régulation du procédé doit être amélioré. Les matériaux peuvent être injectés par les tuyères.
Four rotatif	Fusion	Vitesse de fusion élevée avec l'oxygène. La rotation assure un mélange homogène.	Procédé discontinu
Four électrique (à résistances, à induction ou à arc)	Fusion	Faible volume de gaz émis. Conditions réductrices. Alimentation via les électrodes.	Coût énergétique
ISA Smelt	Fusion	Large panel de matériaux. Récupération d'autres métaux (Cu, par ex.)	Taille minimale
Four à réverbères	Fusion et coupellation	A fait la preuve de son efficacité. Combine différents procédés.	Procédé discontinu
Four à air enrichi soufflé par le haut ou four d'oxycombustion rotatif inclinable (TROF)	Fusion ou coupellation	Compact, s'effectue facilement en enceinte fermée. Combine différents procédés.	Parfois coûteux. Procédé discontinu
Four de grillage pour la recirculation des gaz	Grillage du sélénium, fusion	Transfert de chaleur optimisé	
Coupelle à oxygène soufflé par le fond	Coupellation	Consommation réduite de combustible. Rendement de récupération et de traitement élevé. Les gaz ascendants sont lavés à l'aide d'une couche de litharge fondue.	Procédé discontinu
Coupelle	Coupellation		Repose beaucoup sur la collecte des fumées.

Tableau 6.10 : Fours de fusion et de coupellation

6.3.3 Collecte et dépollution des fumées/gaz

Les techniques présentées dans la section 2.7 de ce document sont les techniques à envisager en tant qu'étapes de procédé nécessaires à la production de métaux précieux, etc. La mise en place de hottes secondaires sur les goulottes de coulée, les moules et les portes de chargement est également une technique à prendre en compte. Les procédés impliquant généralement des opérations à petite échelle, les techniques telles que la mise en étanchéité et le confinement des réacteurs peuvent être mises en œuvre facilement et à moindre coût.

EXEMPLE 6.02 COLLECTE DES FUMÉES

Description : Zone de chargement et de vidange simultanés d'un four rotatif.

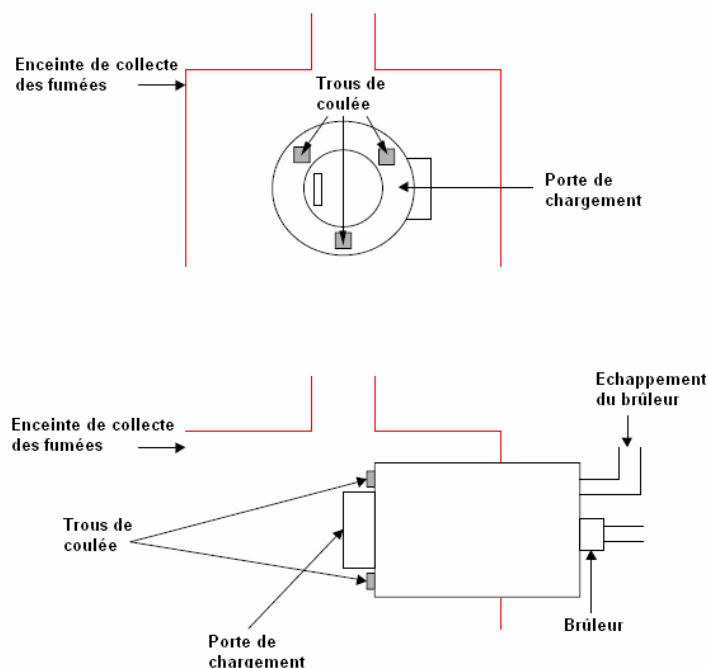


Figure 6.5 : Système combiné de collecte des fumées

Du fait de l'usure du garnissage du four, les trous de coulée situés à l'extrémité de la porte peuvent empêcher le vidange de la totalité du métal.

Principaux bénéfices environnementaux : Collecte plus simple des fumées à partir d'un point unique.

Données opérationnelles : Données non disponibles.

Effets croisés : Effet positif : efficacité de collecte élevée et réduction de la consommation énergétique par rapport à d'autres systèmes de ce type.

Aspects économiques : Les modifications techniques sont peu coûteuses ; un certain nombre d'installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Tous fours rotatifs.

Exploitations de référence : France, RU

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

Plusieurs aspects spécifiques à un site donné sont concernés ; certains d'entre eux sont abordés plus haut dans ce chapitre. En substance, les techniques de procédé présentées dans ce chapitre, associées à une dépollution adaptée, sont en mesure de satisfaire les exigences relatives à une protection stricte de l'environnement. Le tableau ci-dessous propose une série de techniques d'élimination des constituants présents dans les effluents gazeux.

Réactif utilisé	Constituant des effluents gazeux	Méthode de traitement
Solvants, COV	COV, odeurs	Confinement, condensation. Charbon actif, biofiltre
Acide sulfurique (+ soufre dans les combustibles ou les matières premières)	Dioxyde de soufre	Système d'épuration par voie humide ou semi-sèche
Eau régale	NOCl, NO _x	Système d'épuration à la soude caustique
Chlore, HCl	Cl ₂	Système d'épuration à la soude caustique
Acide nitrique	NO _x	Oxydation et absorption, recyclage, système d'épuration
Na ou KCN	HCN	Oxydation au peroxyde d'hydrogène ou à l'hypochlorite
Ammoniac	NH ₃	Récupération, système d'épuration
Chlorure d'ammonium	aérosols	Récupération par sublimation, système d'épuration
Hydrazine	N ₂ H ₄ (cancérigène potentiel)	Epurateur ou charbon actif
Borohydrure de sodium	Hydrogène (risque d'explosion)	A éviter si possible lors du traitement des MGP (Os, Ru notamment)
Acide formique	Formaldéhyde	Système d'épuration à la soude caustique
Chlorate de sodium / HCl	Oxydes de Cl ₂ (risque d'explosion)	Régulation des étapes finales du procédé
Dans certaines régions, l'utilisation d'hypochlorite est interdite.		

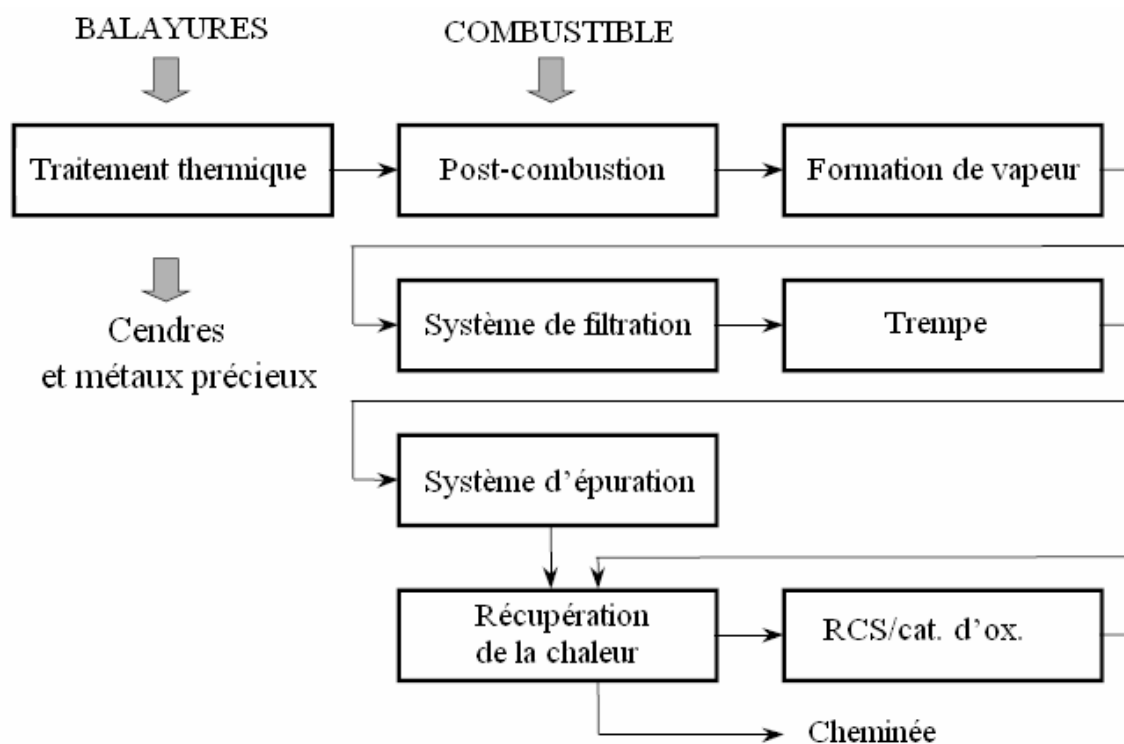
Tableau 6.11 : Méthodes de traitement chimique applicables à certains constituants gazeux

Le secteur utilise également des fours de fusion, ainsi que des fours électriques (à induction, à arc ou à résistances) et des fours chauffés au gaz ou au fioul. Les fours à induction évitent la formation de gaz de combustion ; il est donc possible, dans ce cas, de limiter la taille de l'unité de dépollution.

Les procédés hydrométallurgiques sont importants dans certains procédés de production. Etant donné qu'ils comprennent des étapes de lixiviation et d'électrolyse, il est nécessaire de récupérer ou de traiter les gaz émis (HCl, par ex.). L'élimination des matériaux lixiviés et de l'électrolyte usagé doit également respecter certaines règles. Les techniques de prévention des émissions dans l'eau présentées dans la section 2.9, notamment celles relatives au confinement des systèmes de drainage, doivent être prises en compte, de même que celles permettant de récupérer les COV et d'utiliser les solvants inertes.

EXEMPLE 6.03 UTILISATION DE LA SCR OU DE LA SNCR

Description : Utilisation de la SCR ou de la SNCR dans les procédés de transformation des métaux précieux.



Principaux bénéfices environnementaux : Élimination des NO_x.

Données opérationnelles : Données non disponibles.

Effets croisés : Consommation de réactifs et d'énergie.

Aspects économiques : Cette technique est viable dans une installation.

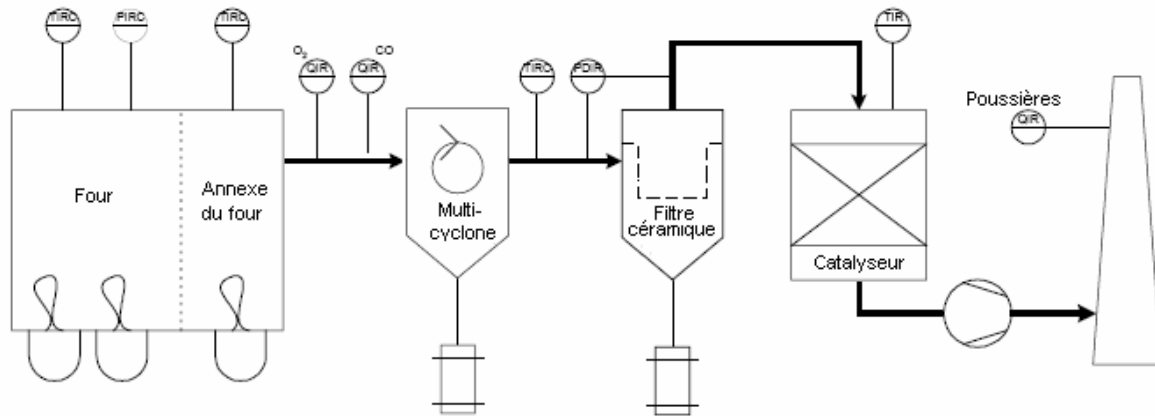
Applicabilité : Données non communiquées.

Exploitations de référence : Allemagne

Documents de référence : [German response to second Draft]

EXEMPLE 6.04 DESTRUCTION CATALYTIQUE DES DIOXINES

Description : Utilisation d'un réacteur catalytique pour éliminer les dioxines.



Courant d'air rejeté : 800 m³ /h

Filtre céramique

Gaz pur : ≤ 10 mg (de pouss.)/m³
 Surface du filtre : 24 m²
 Baisse de pression : 15 hPa
 Température : 400 °C max.

Catalyseur

Dioxine/furane : $\leq 0,1$ ng/m³
 Volume : 170 l
 Capacité max. : 1 500 m³/h
 Temps de séjour : $> 0,25$ s

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination des dioxines.

Données opérationnelles : Concentration finale $< 0,01$ ng/Nm³.

Effets croisés : Consommation d'énergie.

Aspects économiques : Cette technique est viable dans une installation.

Applicabilité : Données non communiquées.

Exploitations de référence : Allemagne

Documents de référence : [German response to second Draft]

6.3.4 Régulation des procédés

Les principes de régulation des procédés présentés dans la section 2.6 sont applicables aux procédés de production utilisés pour ce groupe de métaux. Beaucoup de ces techniques permettent d'optimiser certains des fours et procédés présentés.

EXEMPLE 6.05 REGULATION DE PROCEDE APPLIQUEE AU FOUR MILLER

Description : Le procédé Miller consiste à fondre l'or à environ 1 000 °C tout en soufflant du chlore gazeux dans la charge en fusion. Les impuretés métalliques forment des chlorures et forment un laitier ou sont vaporisées. La quantité de chlore initialement introduite est élevée et les émissions de chlore en excès sont donc probables. La régulation de l'ajout de chlore s'effectue difficilement de façon manuelle. La plupart des chlorures métalliques se forment de façon exothermique et la mise en place d'un système de surveillance en continu de la température peut permettre de réguler le débit des ajouts de chlore.

Principaux bénéfices environnementaux : Prévention des émissions de chlore.

Données opérationnelles : Les données indiquent que les émissions libres de chlore dans l'air seraient inférieures à 1 ppm après passage dans un laveur venturi et dans un électrofiltre par voie humide.

Effets croisés : Effets positifs – Limitation de la consommation en excès de chlore.

Aspects économiques : Aucune évaluation n'a été effectuée ; toutefois les coûts induits sont faibles, et cette technique a fait la preuve de sa viabilité économique.

Applicabilité : Tous procédés Miller.

Exploitations de référence : RU

Documents de référence : [tm 005, HMIP 1993]

6.3.5 Eaux usées

Les eaux usées constituent un aspect spécifique à chaque site. D'après les chiffres, les systèmes de traitement existants sont très performants. L'intégralité du volume d'eaux usées doit être traitée pour éliminer les métaux et les matières solides dissous ; les déchets à base de cyanure et les solutions doivent également être traités. Les conduites d'alimentation d'eau peuvent être séparées des conduites contenant les effluents. Les techniques énumérées dans les sections 2.9 et 6.2.3 sont les techniques à prendre en compte. Dans certaines installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées (y compris les eaux de pluie) sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

6.3.6 Techniques générales

- Caractérisation des matières premières avant leur réception de façon à pouvoir identifier toute(s) impuretés et contamination éventuelle(s) et à tenir compte des contraintes de manutention, de stockage et de traitement associées. Cela permet également de transférer, au besoin, les matériaux vers une autre unité de traitement.
- Échantillonnage et analyse des matières premières dès que possible afin de confirmer certains aspects commerciaux et de définir les options de procédé envisageables pour une matière première donnée.
- Systèmes de manutention des matières premières permettant de minimiser les risques de fuite de liquides et les émissions de poussières. Il est nécessaire d'utiliser des conditionnements solides pour le transport et le stockage.
- Les matières premières sont stockées dans des locaux fermés. Les matériaux réactifs sont stockés, au besoin, dans des endroits séparés.
- Prétraitement du film et du papier photographiques dans un four rotatif ou une chambre de post-combustion, associé(e) à un système haute performance de trempe des cendres. Il peut être nécessaire d'épurer le HCl contenu dans les effluents gazeux et d'éliminer les poussières. Si les matières

premières présentent de légères quantités de papier, il faut effectuer une lixiviation à l'aide de thiosulfate de sodium et d'enzymes.

- Les catalyseurs et les petites quantités de matériaux contenant des MGP sont prétraités dans des incinérateurs à moufle utilisant, au besoin, une chambre de post-combustion, des filtres à manches et des épurateurs spéciaux conçus professionnellement et présentant une haute performance, de façon à empêcher les fuites. Dans la mesure du possible, il faut récupérer la chaleur en vue de produire de l'énergie ou de récupération.
- Le prétraitement de petites quantités de matériaux s'effectue dans des incinérateurs à moufle hermétiques, associés au besoin à des équipements de collecte et de dépollution conçus professionnellement et présentant une haute performance (unité de post-combustion, par ex.).
- Dans la mesure du possible, utilisation de techniques telles que la calcination ou la lixiviation/dissolution afin de récupérer le support des catalyseurs. Ce matériau peut être récupéré tel quel ou sous forme de produit broyé, de sels d'aluminium ou encore de laitier inerte.
- Mise en œuvre de procédés établis de récupération et d'affinage des métaux précieux, en combinaison avec des systèmes de dépollution établis et efficaces auxquels l'opérateur a accès, qui remplissent les normes environnementales abordées dans la section 2.8 de ce document. Utilisation de cuivre, plutôt que de plomb, dans le circuit de fusion.
- Systèmes d'extraction par solvant utilisant, dans la mesure du possible, des solvants non-toxiques. Mise en œuvre de systèmes de confinement, de récupération des COV et de dépollution.
- Régulation du fonctionnement des fours afin d'optimiser les conditions de fonctionnement. Les principaux paramètres sont les suivants : température à différents endroits du four et du système de manipulation des gaz ; concentration d'oxygène et de monoxyde de carbone ; pression. Ces données servent, si possible, à réguler la vitesse d'alimentation des matériaux.
- Méthodes adaptées de régulation des procédés chimiques et hydrométallurgiques et de l'unité de dépollution, de façon à pouvoir maintenir les conditions de fonctionnement à un niveau optimal et à fournir un système d'alerte pour des conditions de fonctionnement qui sont en dehors de la gamme de fonctionnement acceptable.
- Collecte et réutilisation des gaz acides (HCl , HNO_3 , Cl_2 , par ex.). Traitement du cyanure contenu dans les flux de gaz.
- Conception professionnelle des systèmes de collecte et de dépollution des poussières, des gaz acides, du cyanure, des COV et des vapeurs métalliques. Utilisation de ces systèmes pour empêcher et réduire les émissions dans l'environnement. Les niveaux d'émissions atteignables sont présentés plus loin.
- Utilisation de systèmes de drainage confinés si possible. Les effluents, ainsi que les liquides d'épuration, sont traités en fonction des éléments qu'ils contiennent puis analysés avant d'être rejetés.
- Les déchets sont analysés avant d'être transférés vers d'autres sites de façon à suivre la filière d'élimination ou de récupération appropriée.
- Les techniciens doivent être formés et se conformer aux instructions relatives aux procédures de fonctionnement correctes et aux paramètres de régulation applicables.
- Application de bonnes pratiques de maintenance de l'unité de process, des systèmes de dépollution et d'autres procédés associés. Un dispositif d'inspection doit être mis en place pour ce type de système.

6.3.7 Utilisation de l'énergie

La réutilisation de l'énergie ou la production d'électricité sont des techniques à prendre en compte, dès lors que les conditions spécifiques à chaque site le permettent à moindre coût.

6.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associées présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production des métaux précieux : COV, poussières, fumées, dioxines, odeurs, NO_x, autres gaz acides tels que le chlore et le SO₂, eaux usées, résidus tels que les boues, les poussières sous filtre et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associées pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut

s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations neuves peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par des matières organiques. Il peut y avoir une ou plusieurs source(s) de matières premières primaires, des matières premières secondaires de qualité variable ou un mélange de matières premières primaires et secondaires.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; par exemple, certains procédés permettent d'éviter tout transfert en poches et sont donc plus faciles à conduire de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux recyclés et permettent donc de minimiser l'impact environnemental en empêchant leur rejet.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé et du système de traitement des effluents est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les matières premières disponibles sur le site et la capacité de traitement de l'installation – ces questions sont donc spécifiques à un site donné. Les procédés primaires capables de fonctionner avec des matières premières secondaires présentent certains avantages.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées par le procédé ?
- La nature de la charge et des autres métaux qu'elle contient (Cu, Pb, Zn, par ex.) a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les niveaux d'émissions atteignables sont présentés plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

A l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de capacité de production réalisable et de matériaux pouvant être utilisés ; il existe donc différentes combinaisons possibles. Tous ces procédés maximisent la réutilisation des résidus tout en minimisant les émissions dans le milieu aquatique. Leurs caractéristiques économiques varient également : certains doivent fonctionner à une capacité élevée pour être rentables, tandis que d'autres ne permettent pas de fournir d'importantes capacités de production.

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » ; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un processus ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local. Les exemples donnés dans la section consacrée aux techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD présentent les concentrations associées à certains procédés existants [tm 137 Copper Expert Group 1998].

6.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions relatives aux meilleures techniques disponibles en termes de stockage et de manutention des matériaux figurant dans la section 2.17 de ce document sont applicables aux métaux du présent chapitre.

6.4.2 Choix du procédé

Il est impossible de conclure que seul un procédé de production est applicable à ce groupe de métaux. Les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques utilisés à l'heure actuelle constituent la base des MTD ; ils doivent être appliqués en complément des facteurs généraux et des techniques de collecte et de dépollution des fumées décrites ci-dessus et dans le Chapitre 2.

L'utilisation de la filière du cuivre pour la fusion des métaux précieux permet de réduire le risque d'émissions de plomb dans les milieux environnementaux ; elle doit être utilisée si la combinaison de matières premières, d'équipements et de produits le permet.

6.4.2.1 Procédés de prétraitement

Les procédés de prétraitement sont décrits plus haut dans ce chapitre : ils servent à traiter et à échantillonner les matériaux entrants. Un large panel de procédés applicables aux différents matériaux a été développé et il n'est pas possible de choisir un unique procédé de prétraitement. Les principes sur lesquels reposent les MTD relatives au prétraitement concernent donc la manière dont les matériaux sont manipulés et transférés, la manière dont le procédé est confiné et régulé, ainsi que la mise en œuvre d'une dépollution solide et efficace des matériaux et réactifs utilisés.

Ces aspects sont abordés dans les sections 2.3 à 2.10. Le tableau 6.11 présente les méthodes de traitement chimique applicables à certains réactifs.

6.4.2.2 Étapes du procédé pyrométallurgique

Technique appliquée	Matières premières	Commentaires
Four Miller	Alliages d'or	Four à induction ou au gaz/fioul. Régulation thermique ou dosage du chlore. Systèmes de collecte performants.
Four de coupellation BBOC	Alliages d'argent (+ Cu, Pb)	Une lance à oxygène dans un four à réverbères ou une BBOC permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter le taux de récupération.
TBRC et TROF	Concentrés mixtes, boues et matières secondaires	Avec matériaux à base de cuivre / plomb. Four fermé.
Haut fourneau	Balayures, cendres et concentrés	Nécessite un système de régulation moderne, une étape de post-combustion et une dépollution efficace. Élimination éventuelle des gaz acides.
Four de grillage pour la recirculation des gaz	Boues anodiques	Élimination et récupération du sélénium
Four rotatif	Cendres et concentrés	Utilisation d'd'oxycombustion. Nécessité d'une collecte efficace des fumées durant tout le process.
Four électrique	Cendres et concentrés	Four hermétique. Alimentation via les électrodes. Réduction possible du volume de gaz.
Four ISA Smelt	Concentrés mixtes et matières secondaires	Avec matériaux à base de cuivre / plomb.

Tableau 6.12 : Différents options de fours pour les métaux précieux

6.4.2.3 Étapes du procédé hydrométallurgique

En substance, les techniques de procédé présentées dans ce chapitre, associées à des modes de dépollution adaptés, sont en mesure de satisfaire à des normes environnementales strictes. Ce document propose un exemple de collecte du chlore gazeux émis au niveau de l'anode au cours de l'extraction électrolytique, de la lixiviation et de l'affinage. Parmi les autres techniques figurent notamment le confinement des vapeurs de solvants au moyen de réacteurs d'extraction de solvant fermés, la collecte et la réutilisation des solvants et autres substances. L'utilisation des circuits de collecte présentés dans la section 6.2 sont particulièrement pertinents, tout comme les méthodes de traitement chimique pour les produits de réaction présentés dans le tableau 6.11. L'importance des constituants de tous les COV dépend du solvant utilisé ; ce facteur ne peut être déterminé qu'au niveau local.

6.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les systèmes de collecte des fumées utilisés peuvent tirer parti de dispositifs de mise en étanchéité des fours ou des réacteurs et être conçus de façon à y maintenir une dépression appropriée afin d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Il est possible d'avoir recours à des systèmes assurant l'étanchéité des fours ou de mettre en place des hottes. Les ajouts de matériaux s'effectuent par exemple par les électrodes, par les tuyères, par les lances, ou en plaçant sur les dispositifs d'alimentation des valves rotatives solides. Les dispositifs secondaires de collecte des fumées sont coûteux et consomment beaucoup d'énergie ; leur installation est toutefois nécessaire en présence de certains types de fours. Le système utilisé doit être intelligent et capable de cibler l'extraction des fumées selon la source et la durée des émissions de fumées.

Les meilleures techniques disponibles concernant les dispositifs de traitement des gaz et des fumées sont celles qui assurent un refroidissement et une récupération de la chaleur avant un filtre à manches, si la configuration le permet. Il est possible d'utiliser des filtres à manches constitués de matériaux haute performance modernes associés à une structure bien conçue et convenablement entretenue. Ces filtres comportent des systèmes de détection de rupture de manche et des méthodes de décolmatage en ligne. Le traitement des gaz issus des étapes de fusion ou d'incinération devrait comprendre une étape d'élimination du dioxyde de soufre et/ou de post-combustion, si cela permet d'éviter de détériorer la qualité de l'air au niveau local, régional ou à longue distance, ou encore en présence éventuelle de dioxines.

Étape de procédé	Constituants des effluents gazeux	Techniques de dépollution utilisables
Manutention des matières premières	Poussières et métaux	Stockage approprié Collecte des poussières et filtre à manches si nécessaire
Prétraitement des matières premières	Poussières et métaux	Prétraitement approprié Collecte des gaz et filtre à manches
Incinération des balayures et des films	Matières organiques *	Fonctionnement du procédé, post-combustion, refroidissement des gaz approprié et filtre à manches
Grillage et fusion	Poussières et métaux Monoxyde de carbone et matières organiques * Dioxyde de soufre	Fonctionnement du procédé, collecte et refroidissement des gaz, filtre à manches Post-combustion, injection de carbone Épuration si nécessaire
Grillage du sélénium	Poussières et métaux Dioxyde de soufre	Fonctionnement du procédé, collecte et refroidissement des gaz, élimination des poussières Épuration et électrofiltre humide
Dissolution et affinage chimique	Brouillards, métaux et gaz acides Autres gaz	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz à l'aide d'un épurateur oxydant Voir le tableau 6.11
Distillation	Chlore, brome et tétraoxydes	Enceinte fermée. Absorbant/condenseur et épurateur
Extraction par solvant	COV et odeurs	Confinement, condenseur Carbone ou biofiltre si nécessaire
Extraction électrolytique	Brouillards acides	Collecte des gaz et épuration/dévésiculeur
Affinage thermique (procédé Miller)	Poussières et métaux Chlore	Fonctionnement du procédé et collecte des gaz Épuration et électrofiltre humide
Fusion, préparation des alliages et coulée	Poussières et métaux Matières organiques *	Fonctionnement du procédé, collecte et refroidissement des gaz, filtre à manches. Fonctionnement du procédé, post-combustion et refroidissement approprié des gaz
Traitement du laitier et coupellation	Poussières et métaux	Fonctionnement du procédé, collecte et refroidissement des gaz, filtre à manches.

Note* : Les matières organiques peuvent comprendre des COV exprimés en carbone total (sauf monoxyde de carbone) et des dioxines.

Tableau 6.13 : Procédés de dépollution considérés comme meilleures techniques disponibles

Les systèmes de récupération des gaz acides et des solvants et les étapes de récupération des poussières et des métaux associées sont ceux présentés dans la section 2.8 de ce document. Les systèmes de collecte des fumées doivent être conformes aux meilleures pratiques décrites dans la section 2.7. L'utilisation ou le recyclage des acides, des laitiers, des boues et des poussières sous filtre est considéré(e) comme partie intégrante de ces procédés.

D'autres systèmes de dépollution sont considérés comme applicables à d'autres parties du procédé et un panorama est donné dans le tableau ci-dessus.

6.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions captées / réduites provenant des différentes sources, auxquelles s'ajoutent les émissions fugitives ou non-captées provenant de ces mêmes sources. Utilisés convenablement, les systèmes modernes permettent une élimination efficace des polluants. Les informations disponibles à l'heure de la rédaction du présent document indiquent que les émissions fugitives peuvent être la principale source d'émissions totales.

Pour l'ensemble des procédés, les émissions totales dans l'air comprennent celles provenant :

- des étapes de manutention et de stockage, de séchage, d'agglomération, de frittage, de grillage et de fusion des matériaux ;
- des procédés de vaporisation du laitier ou des métaux ;
- des étapes d'affinage chimique, d'affinage thermique et d'extraction électrolytique ;
- des étapes de fusion, de préparation des alliages, de coulée, etc.

Les émissions fugitives peuvent être extrêmement importantes ; il est possible d'établir des prévisions en s'appuyant sur le rendement de captage des fumées et en effectuant une surveillance de l'environnement (voir la section 2.7). Les émissions fugitives peuvent être estimées en grammes par an (g/a) ou en grammes par tonne de métal produite (g/t métal produite). Les émissions collectées peuvent elles aussi être exprimées avec ces unités ou, plus souvent, en termes de concentration.

Les données proposées dans la section 2.8 pour les divers types de procédés de dépollution sont applicables à la plupart des émissions dans l'air (plage d'émissions de poussières réalisable à l'aide d'un filtre à manches, par ex.) ; ces valeurs permettent de déterminer les autres facteurs tels que la concentration de métal. Les tableaux suivants présentent de façon schématique les émissions dans l'air collectées ou fugitives.

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Flux d'effluents gazeux à faible teneur en SO ₂ (~ 1 – 4 %)	Rendement de conversion > 99,1 %	Unité de production d'acide sulfurique de contact à simple absorption ou procédé WSA (la teneur en SO ₂ des gaz de queue dépend de la concentration des gaz entrants)	Pour les gaz à faible teneur en SO ₂ . Ces procédés doivent être associés à un épurateur par voie sèche ou semi-sèche afin de réduire les émissions de SO ₂ et produire du gypse, s'il existe des débouchés.
Flux d'effluents gazeux à teneur élevée en SO ₂ (> 5 %)	Rendement de conversion > 99,7 %	Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption (la teneur en SO ₂ des gaz de queue dépend de la concentration des gaz entrants). Un dévésiculeur peut être adapté pour éliminer le SO ₃ résiduel.	Le traitement intensif des gaz (laveur humide et électrofiltre par voie humide et, au besoin, élimination du mercure pour garantir la qualité du H ₂ SO ₄ produit) avant l'unité de contact permet d'atteindre un niveau minime d'autres polluants atmosphériques.
<p>Note : Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 6.14 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD et provenant des procédés métallurgiques complexes de récupération des métaux précieux, en combinaison avec la production de cuivre et de plomb

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Brouillards acides Gaz acides	< 50 mg/Nm ³ < 5 mg/Nm ³	Dévésiculeur Laveur humide alcalin ou épurateur oxydant	Un dévésiculeur permet de réutiliser l'acide collecté.
SO ₂	< 50 mg/Nm ³	Laveur humide alcalin Épurateur acide	
Ammoniac	< 5 mg/Nm ³		
Chlore, brome, tétraoxydes	< 2,0 mg/Nm ³	Épurateur oxydant	
NO _x	< 100 mg/Nm ³	Épurateur oxydant	Récupération de l'acide nitrique, puis élimination des traces. La plage proposée n'est pas atteignable en cas d'utilisation d'eau régale.
COV ou solvants sous forme de C	< 5 – 15 mg/Nm ³	Confinement, condenseur, carbone ou biofiltre	
<p>Note : Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.</p> <p>S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 6.15 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD provenant de l'extraction et de l'affinage chimiques, de l'extraction électrolytique et de l'extraction par solvant permettant de récupérer les métaux précieux

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches Filtre céramique	Les filtres à manches haute performance peuvent permettre d'atteindre des niveaux bas de métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à celle des poussières et à la teneur en métaux des poussières.
Chlorures, fluorures et gaz acides	SO ₂ < 100 mg/Nm ³ Chlorures < 5 mg/Nm ³ Fluorures < 1 mg/Nm ³	Épurateur alcalin par voie humide ou semi-sèche	
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 - 300 mg/Nm ³	Brûleur bas NO _x , SCR ou SNCR Brûleur oxycombustible	Les valeurs plus élevées correspondent à un enrichissement à l'oxygène pour réduire la consommation d'énergie. Dans ce cas, le volume de gaz et l'émission en masse sont réduits.
Carbone organique total exprimé en C	< 5 - 15 mg/Nm ³	Dispositif de post-combustion Combustion optimisée	Prétraitement des matières secondaires pour éliminer, au besoin, les revêtements organiques.
Dioxines	< 0,1 – 0,5 ngTEQ/Nm ³	Système d'élimination des poussières à haute efficacité (filtre à manches), post-combustion puis trempe. D'autres techniques sont disponibles (adsorption sur charbon actif, catalyseur d'oxydation, par ex.).	Il peut être nécessaire de traiter les gaz propres et dépoussiérés pour atteindre des niveaux d'émissions bas.
<p>Note : Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période de d'échantillonnage. S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée. Concernant l'élimination du SO₂ ou du carbone total, les variations de la concentration de gaz brut au cours des procédés discontinus peuvent affecter les performances du système de dépollution.</p>			

Tableau 6.16 : Émissions dans l'air associées à l'usage des MTD provenant du prétraitement (incinération y comprise), du grillage, de la coupellation, de la fusion, de l'affinage thermique et de la fusion des matériaux en vue de la récupération des métaux précieux

Les émissions de métaux dépendent largement de la composition des poussières générées par les procédés. Cette composition varie fortement en fonction a) du procédé qui est source de poussières et b) des matières premières transformées. Par exemple, les poussières produites par un four de fusion sont totalement différentes de celles générées au cours de l'incinération. La teneur en métaux des poussières varie donc considérablement d'un procédé à l'autre, mais aussi, pour un type de four donné, en fonction de la nature des matières premières utilisées. Dans ce document, il n'est donc pas possible de détailler avec précision les concentrations atteignables spécifiques à chaque métal émis dans l'air. Il s'agit en effet d'un aspect spécifique à chaque site.

Certains métaux comportent des formes toxiques qui peuvent être émises lors des procédés et doivent ainsi être réduites afin de satisfaire aux normes de la qualité de l'air spécifiques aux niveaux local, régional ou à longue distance. On considère que l'utilisation de systèmes de dépollution haute performance modernes (filtres à manches à membrane, par ex.) permet d'atteindre des concentrations faibles de métaux lourds dès lors que la température de fonctionnement est adaptée et que la conception tient compte des caractéristiques des gaz et des poussières.

6.4.4 Eaux usées

Les eaux usées constituent un aspect spécifique à chaque site. L'intégralité du volume d'eaux usées doit être traitée pour éliminer les matières solides, les métaux et les constituants absorbés dans les huiles ou les goudrons ; on effectue au besoin une neutralisation.

En termes de production primaire et secondaire, les émissions totales dans l'eau proviennent :

- du système de traitement ou de trempe des cendres ;
- du procédé d'extraction électrolytique et des étapes de lixiviation et de dissolution ;
- du système de traitement des eaux usées.

Le tableau suivant résume les concentrations atteignables à l'aide de méthodes adaptées de traitement des effluents (précipitation des ions métalliques sous forme de sulfures, par ex.).

Principaux constituants [mg/l]				
Ag	Pb	Hg	Cu	Ni
0,02	0,05	0,01	0,3	0,03
Note : Les plages associées sont des moyennes horaires ou journalières, en fonction de la méthode de dosage.				

Tableau 6.17 : Émissions dans l'eau associées à l'utilisation des MTD

6.4.5 Résidus de traitement

L'utilisation ou le recyclage des laitiers et des résidus est considéré(e) comme partie intégrante du processus. Les procédés de production dans ce secteur ont été développés par les industriels dans deux objectifs : maximiser la réutilisation de la majorité des résidus de procédé provenant des unités de production, ou produire ces résidus sous une forme qui permette de les utiliser dans le procédé ou dans d'autres procédés de production des métaux non-ferreux.

Le niveau d'émissions dans le sol est donc fortement lié au site spécifique et aux matériaux spécifiquement utilisés, et dépend des facteurs abordés plus haut. Il est par conséquent impossible d'élaborer un tableau réaliste et représentatif des quantités associées à l'utilisation des MTD sans détailler les caractéristiques de chaque matière première. Les principes sur lesquels reposent les MTD comprennent la prévention et la limitation des déchets, ainsi que la réutilisation des résidus, si toutefois les conditions le permettent.

6.4.6 Coûts associés aux MTD

Les données relatives aux coûts ont été compilées pour un panel de procédés et de systèmes de dépollution diversifié. Ces chiffres sont très spécifiques à chaque site et dépendent d'un certain nombre de facteurs. Les fourchettes de valeurs proposées peuvent toutefois permettre d'établir des comparaisons. Les données

sont présentées en annexe à ce document de façon à ce que les coûts relatifs aux divers procédés de l'industrie des métaux non-ferreux puissent être comparés.

6.5 Techniques émergentes

- Le procédé « J » n'est pas utilisé en Europe ; il fonctionne avec un stock d'or réduit, par rapport aux autres procédés d'affinage de l'or. Ce procédé consiste à dissoudre l'or impur ($< 99,5\%$) à l'aide d'une solution iodée régénérable. L'or est réduit à l'aide d'hydroxyde de potassium, séparé, lavé puis séché ; on obtient une poudre contenant $99,995\%$ d'or. La solution issue de l'étape de réduction est envoyée dans une cellule électrolytique. Les impuretés solubles et, le cas échéant, l'iodure d'or non réduit, y sont déposés sur la cathode puis éliminés pour être récupérés dans un circuit de métaux précieux. La solution est ensuite transférée dans une cellule électrolytique à diaphragme munie d'électrodes inertes. La solution iodée produite dans le compartiment de l'anode et la solution de KOH produite dans le compartiment de la cathode sont recyclées [tm 5, HMIP PM 1993].
- Le recours à la filière du cuivre pour la fusion des matières premières secondaires contenant de l'argent empêche l'émission de composés de plomb dans l'air. La démonstration de ce procédé a été réalisée dans une unité de production du Royaume-Uni ; c'est la filière utilisée, par définition, dans les unités d'affinage du cuivre.
- Un procédé a été mis au point pour traiter le concentré de pyrite, qui contient des particules d'or microscopiques ($< 1\text{ }\mu\text{m}$). Il permet d'obtenir un alliage or-métal aurifère, un concentré plomb/argent et un concentré de zinc [tm 216, Gryllia 1999]. Les schémas de procédé relatifs au traitement du minerai et aux étapes métallurgiques sont présentés ci-dessous.

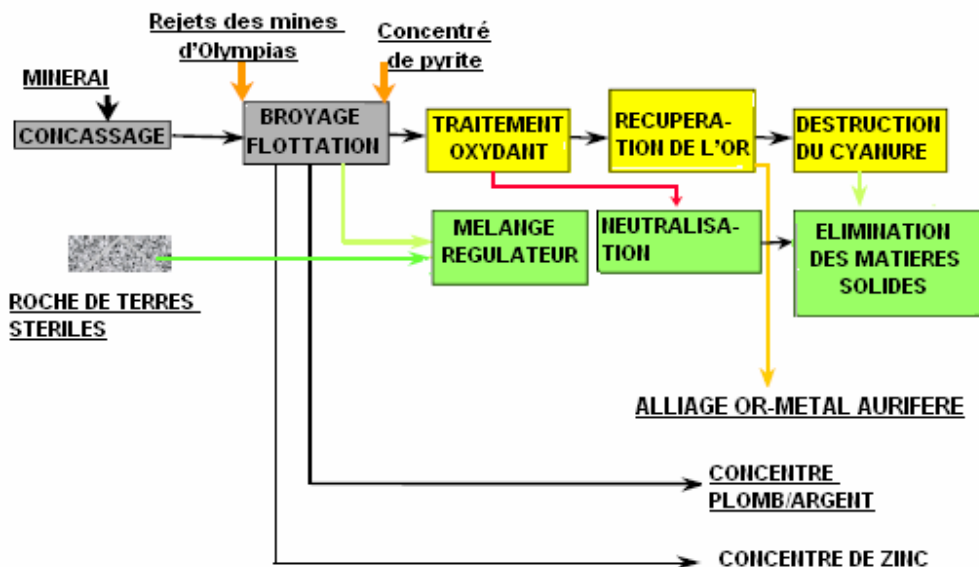


Figure 6.6 : Schéma de procédé du traitement du minerai

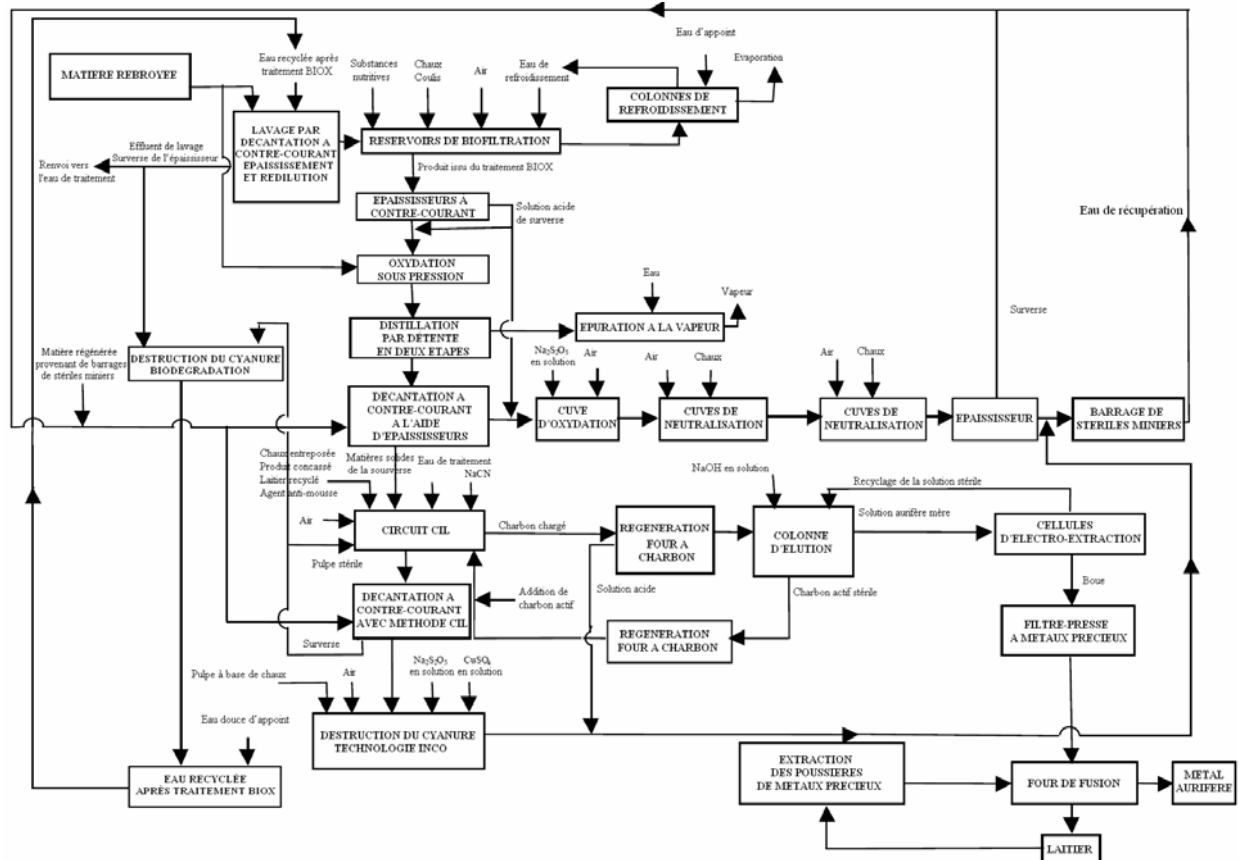


Figure 6.7 : Schéma des procédés métallurgiques

7 PROCÉDÉS DE PRODUCTION DU MERCURE

7.1 Procédés et techniques appliqués

Le marché du mercure s'est essoufflé ces dernières années, ce qui a eu un impact important sur le secteur. La production primaire à partir des minerais s'effectue désormais par campagnes d'une durée de quelques mois par an. La production basée sur la fraction de mercure issue des autres procédés appliqués aux métaux non-ferreux ne peut être revue à la baisse de cette façon ; les usines de cuivre, de plomb et de zinc qui produisent du mercure via les systèmes d'épuration utilisés avant les unités d'acide sulfurique peuvent se servir du procédé Boliden-Norzink pour fabriquer du calomel, qui est ensuite stocké ou éliminé. A l'heure actuelle, la production de mercure secondaire reposant sur le traitement des amalgames dentaires ou des lampes à mercure s'effectue généralement sous forme de service d'élimination du mercure permettant d'obtenir une charge exempte de mercure, rejetée ou utilisée en vue de récupérer des métaux précieux.

7.1.1 Production primaire

7.1.1.1 Production de mercure à partir du cinabre

En Europe, seule une producteur produit du mercure à partir du minerai de cinabre ; le procédé utilisé est comparable à celui appliqué dans le reste du monde, la principale différence étant que le minerai européen présente une teneur plus élevée en mercure, ce qui signifie qu'il n'a pas besoin d'être concentré [tm 70, Mercury Expert Group 1998 ; tm 71, Mercury Congress 1974].

La roche contenant du cinabre (HgS) est concassée, en deux étapes, en fragments d'environ 25 mm de diamètre. On utilise un système d'extraction et des filtres à manches pour traiter les poussières provenant des concasseurs et des convoyeurs. La roche concassée est chauffée jusqu'à 750 °C dans des fours Herreschoff qui comportent 8 soles et utilisent du propane comme carburant [tm 206, TGI 1999]. Le cinabre est oxydé, ce qui permet d'entraîner le mercure et le dioxyde de soufre dans les effluents gazeux. Le mercure est condensé dans un système comprenant 32 condenseurs en acier refroidis à l'eau, avant d'être collecté. Les gaz sont rejetés par une cheminée après passage dans un épurateur par voie humide, qui absorbe une partie du dioxyde de soufre. La roche grillée est extraite du fond du four et refroidie à l'air. Exempte de mercure, elle sera vendue et utilisée comme matériau pour la construction de routes.

Le mercure condensé est lavé à la soude caustique et au sulfure de sodium, puis le matériau ainsi obtenu est pressé dans un filtre. Le mercure est ensuite distillé jusqu'à un degré de pureté de 99,9 %. Les résidus de la distillation, qui contiennent 5 % de mercure, sont agglomérés avec du ciment puis réalimentés dans le four pour récupérer le mercure résiduel [tm 206, TGI 1999].

L'eau de refroidissement et l'eau provenant du système d'épuration sont réintroduites dans le circuit. Le système est purgé et la fraction obtenue est neutralisée avec de la soude caustique et traitée avec du sulfure de sodium afin de précipiter le sulfure de mercure. Les effluents passent dans un filtre à charbon avant d'être rejetés en rivière [tm 70, Mercury Expert Group 1998].

7.1.1.2 Production à partir des minerais et des concentrés d'autres métaux

L'autre principale source de mercure primaire est constituée par le mercure récupéré lors de la production des autres métaux non-ferreux. Les données indiquent que la teneur en mercure se situe entre 0,02 et 0,8 kg/t de métal (cuivre, zinc ou plomb) [tm 120, TU Aachen 1999]. Dans ces procédés, le mercure est éliminé des effluents gazeux provenant des fours de grillage ou de fusion avant l'unité de production de

l'acide sulfurique. Ces procédés sont présentés dans la section 2.8 et dans les sections consacrées aux différents métaux [tm 26, PARCOM 1996]. Il faut noter que toute fraction de mercure qui ne serait pas captée lors de l'étape d'élimination sera présente dans l'acide sulfurique produit (l'acide obtenu à l'aide de la plupart des procédés présente une concentration $< 0,1$ ppm de mercure). Le mercure contenu dans les résidus issus des différentes étapes d'épuration est normalement récupéré [tm 120, TU Aachen 1999].

7.1.2 Production secondaire

En outre, un certain nombre d'entreprises exploitent des systèmes de récupération du mercure utilisant des amalgames dentaires et des batteries à l'oxyde d'argent comme matières premières [tm 16, HMIP Mercury 1993]. Celles-ci sont généralement conditionnées dans des fûts lorsqu'elles parviennent dans le box de réception équipé d'un système d'extraction des fumées. Les batteries et les pâtes sont chargées dans des conteneurs adaptés à la taille de la cornue du four. On augmente la température de la cornue jusqu'à 700 °C par chauffage indirect tout en appliquant une dépression d'environ 100-mm de mercure ce qui permet d'éliminer le mercure contenu dans le substrat complexe. Les cycles de chauffage peuvent durer jusqu'à 18 h. Les gaz passent dans un condenseur en acier associé à un système de refroidissement hermétique. Le mercure est condensé dans des boîtes étanches puis transféré régulièrement vers une zone de stockage.

La dépression peut être obtenue de différentes façons, notamment à l'aide d'un hydro-éjecteur et d'une pompe à vide à anneau liquide, ce qui permet d'utiliser une matière chargée humide. Les pompes à vide déversent l'air dans un système d'épuration afin d'éliminer le mercure.

7.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Les valeurs d'émissions et de consommations relatives aux procédés de production des autres métaux non-ferreux produisant également du mercure sont données dans les chapitres correspondants (cuivre et zinc/plomb). Ces procédés produisent généralement du mercure ou du chlorure mercureux dans des concentrations allant de 0,02 à 0,8 kg de mercure / t de métal produite, en fonction de la teneur en mercure du concentré [tm 120, TU Aachen 1999].

7.2.1 Mercure primaire

Il y a un risque d'émissions de mercure et de composés de mercure, de dioxyde de soufre et de particules dans l'air et dans l'eau. Les boues issues de la roche grillée et du traitement des effluents contiennent des déchets solides.

Saison	Émissions de Hg dans l'air [mg/Nm ³]	Kg de Hg / t de Hg produite	Émissions de SO ₂ dans l'air [mg/Nm ³]
Hiver	10 - 15	5 - 10	
Été	15 - 20	10 - 20	
Note : Les écarts saisonniers s'expliquent par les variations de température au niveau des condenseurs. Aucune donnée disponible concernant les émissions de SO ₂ .			

Tableau 7.1 : Émissions dans l'air provenant de la production primaire

Année	Émissions de Hg dans l'eau [partie par milliard]	Volume [m ³]
1993	4	31 000
1994	28	11 000
1995	66	32 500
1996	83	29 000
1997	67	45 500

Tableau 7.2 : Émissions dans l'eau provenant de la production primaire

7.2.2 Mercure secondaire

Année	Émissions de Hg dans l'air [mg/Nm ³]	Kg de Hg / t de Hg produite	Émissions de Hg dans l'air [mg/Nm ³]
1997	7	0,002	

Tableau 7.3 : Émissions dans l'air provenant de la production secondaire

Année	Émissions de Hg dans l'eau [partie par milliard]	Volume [m ³]
1997	0,3 g/t	

Tableau 7.4 : Émissions dans l'eau provenant de la production secondaire

7.2.3 Résidus de procédé

La production de métaux s'accompagne de la formation de plusieurs sous-produits, résidus et déchets également énumérés dans le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil 94/3/CE). Les principaux résidus spécifiques aux procédés sont présentés ci-dessous.

La roche grillée exempte de mercure est utilisée pour construire des routes. Elle représente plus de 90 % de la quantité de matières premières.

Les boues provenant du traitement des eaux usées appliqué lors de la production primaire ou secondaire contiennent du sulfure de mercure ou du chlorure mercurieux. Dans le cas de la production primaire, ce matériau est aggloméré puis réalimenté dans le four en vue de récupérer le mercure. Cela n'est pas toujours possible dans le cas de la production secondaire, où de petites quantités sont mises éliminées.

7.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation énergétique dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et de les procédés associés.

Les procédés décrits ci-dessus ont une portée limitée et sont représentatifs des techniques utilisées dans le reste du monde. Ce sont donc les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Toutefois, certaines des techniques de réduction des émissions de mercure associées aux procédés appliqués aux autres métaux non-ferreux sont également applicables à la production de mercure produit à partir de matières premières primaires et secondaires. Les techniques à prendre en compte décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » s'appliquent également à la manutention et au prétraitement des matières premières, ainsi qu'aux systèmes de régulation des procédés et de dépollution. La hiérarchie relative à la prévention des émissions, au confinement et aux systèmes de collecte/dépollution doit, dans la mesure du possible, être respectée.

La petite échelle des procédés de production de mercure à partir de matières premières secondaires (batteries, par ex.) permet de confiner les équipements et de procéder à la condensation et à l'épuration des gaz.

7.3.1 Émissions dans l'air

Le mercure est volatil aux températures appliquées dans la plupart des procédés de dépollution ; on utilise donc d'autres techniques d'élimination spécifiques [tm 26, PARCOM 1996]. Les techniques suivantes, décrites dans la section 2.8, sont appliquées aux gaz des fours de fusion du cuivre, du zinc et du plomb présentant de très faibles concentrations de mercure, comme parties intégrantes de la chaîne d'épuration d'une unité d'acide sulfurique. Les données collectées indiquent que le mercure contenu dans les gaz de condensation émis lors de la transformation du cinabre se présente sous la forme de fines particules difficiles à éliminer au moyen de certains procédés traditionnels. Ces données n'ont toutefois pas encore été confirmées, et la meilleure méthode d'élimination reste à définir. L'oxydation du cinabre s'accompagne également d'une émission de dioxyde de soufre, et on peut alors avoir recours aux procédés présentés dans la section 2.8 permettant d'éliminer de faibles concentrations,.

Le procédé Boliden-Norzink repose sur une épuration par voie humide utilisant la réaction entre le chlorure mercurique et les vapeurs de mercure, ce qui donne du chlorure mercureux (calomel) par précipitation dans la solution. Le chlorure mercurique peut être régénéré à partir du calomel par chloruration, et la récupération du mercure s'effectue par électrolyse. Les données indiquent que ce procédé induirait les coûts d'investissement et d'exploitation les plus bas [tm 139, Finland Zn 1999]. Le chlorure mercurique est un composé du mercure très toxique ; c'est pourquoi la réalisation de ce procédé nécessite un soin extrême.

Le traitement au thiocyanate de sodium est un procédé d'épuration par voie humide qui permet de précipiter le sulfure de mercure. Le thiocyanate de sodium est régénéré.

Le procédé Outokumpu consiste à laver les gaz avec de l'acide sulfurique à 90 % dans une tour à garnissage pour produire du sulfate de mercure, qui est ensuite précipité puis éliminé en vue de sa récupération. Ce procédé permet également d'éliminer le sélénium.

Certains systèmes mettent à profit la réaction entre le mercure et le sélénium, mais la toxicité du sélénium est, là encore, une source de problèmes, et l'élimination des matériaux nécessite un soin important. Le procédé Outokumpu élimine à la fois le mercure et le sélénium à l'aide d'un épurateur à l'acide sulfurique [tm 46, Outokumpu 1984]. Les deux métaux peuvent être récupérés à partir du précipité obtenu. L'épurateur au thiosulfate de sodium est également très efficace ; il utilise un réacteur/épurateur similaire à celui du procédé Boliden-Norzink.

Le procédé Boliden-Norzink est la technique la plus couramment utilisée pour éliminer les émissions de mercure dans l'air. La production de chlorure mercurieux (calomel) à partir de chlorure mercurique est simple, mais du fait de la chute des prix du mercure, un certain nombre de procédés ne prévoient pas la récupération du mercure : ils s'arrêtent avant cette étape et accumulent du calomel. Le procédé permet d'atteindre des niveaux d'émissions compris entre 0,05 et 0,1 mg/Nm³ de mercure dans l'air.

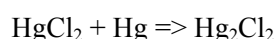
Les filtres d'adsorption à charbon actif servent à éliminer les vapeurs de mercure des effluents gazeux.

Certains secteurs utilisent ce type de filtre pour réduire les émissions de mercure. Le perçage du mercure à travers le filtre est difficile à prévoir ; c'est pourquoi on utilise un système de filtration double, le second filtre servant à gérer le perçage. Lorsque le premier filtre est usagé, il est chargé de charbon frais et le second filtre est utilisé en tête du système. Le charbon peut être régénéré dans un four Herreschoff, tandis que le mercure peut être récupéré. Les filtres à charbon actif permettent d'atteindre des concentrations de mercure comprises entre 0,002 et 0,007 mg/m³, à condition que l'on opte pour le système à deux filtres.

L'utilisation d'un condenseur refroidi à l'air serait un facteur d'amélioration, par abaissement de la température de fonctionnement. Aucune donnée n'est toutefois disponible à l'heure actuelle concernant les performances associées à cette technique.

EXEMPLE 7.01 PROCEDE BOLIDEN-NORZINK

Description : Le gaz est épuré dans une tour à garnissage avec une solution contenant HgCl₂. Celui-ci réagit avec le mercure métal contenu dans le gaz et le précipite sous forme de calomel (Hg₂Cl₂) :



Le calomel est éliminé de la solution circulant dans l'épurateur et partiellement régénéré à l'aide de chlore gazeux sous forme de HgCl₂, qui est ensuite recyclé dans l'étape de lavage. La purge de produit à base de mercure est soit utilisée pour produire du mercure, soit stocké. Dans le procédé Norzink, une partie du précipité (le calomel) est électrolysée pour produire du mercure métal et du chlore gazeux qui réagit avec le reste du calomel pour produire le réactif (HgCl₂) utilisé pour l'épuration.

Un autre procédé utilise du thiocyanate de sodium comme milieu d'épuration ; le mercure est précipité sous forme de sulfure, qui peut être récupéré dans un four de grillage du mercure primaire.

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination et récupération du mercure contenu dans les gaz.

Données opérationnelles : Une usine fonctionnant avec une concentration de mercure entrant de l'ordre de 400 ppm produit de l'acide sulfurique présentant une teneur en mercure d'environ 0,1 mg/l (ppm), ce qui correspond à près de 0,02 mg/Nm³ dans le gaz entrant dans l'unité de production d'acide.

Effets croisés : Coût énergétique induit par le fonctionnement de l'épurateur.

Aspects économiques : Certaines données de coûts publiées indiquent que le procédé Boliden-Norzink (et sans doute aussi le procédé Bolchem) représentait en 1972 un coût d'investissement de 200 000 \$ pour un

volume de production de près de 200 000 t/a d'acide. En 1985, les coûts d'exploitation publiés étaient de 0,5 DEM/t pour le procédé Boliden-Norzink.

Applicabilité : La plupart des systèmes d'élimination du mercure, en fonction du réactif utilisé.

Modèles : Allemagne, Finlande, Suède

Documents de Référence : [tm 139 Finland Zn 1999]

7.3.2 Eaux usées

Les effluents proviennent des systèmes d'épuration et des pompes à vide, ainsi que des liquides déversés et du ruissellement des eaux de surface. Dans toutes les régions du monde, le mercure est éliminé des eaux usées par précipitation sous forme de sulfure de mercure ; le réactif utilisé est du sulfure de sodium et le pH des effluents est régulé. Insoluble, le sulfure de mercure est précipité. On utilise également du charbon actif pour éliminer les traces résiduelles de mercure contenues dans les effluents. On peut facilement atteindre des niveaux d'émissions dans l'eau de 0,05 mg/l, à condition d'éliminer efficacement les matières solides. A cet effet, on utilise parfois des filtres à sable. Les boues et le carbone usagé issus de la production de mercure primaire sont renvoyés dans les fours [tm 70, Mercury Expert Group 1998].

L'élimination du mercure présent dans certains effluents gazeux des fours de grillage constitue une autre source importante d'effluents. L'élimination du mercure s'effectue à l'aide d'un réservoir à contact gaz-liquide et d'une solution de chlorure de mercure (HgCl_2). Celui-ci réagit avec le mercure métal contenu dans les gaz pour former un précipité solide de Hg_2Cl_2 (calomel). La boue qui précipite est éliminée puis oxydée à l'aide de Cl_2 pour former une nouvelle solution de lavage à base de HgCl_2 . Une partie de cette boue liquide est déshydratée à l'aide d'un filtre-presse puis vendue sous forme de Hg_2Cl_2 , qui sera traité en vue de récupérer le mercure ou éliminé en tant que déchet spécial.

Les effluents du procédé sont prétraités au niveau local pour éliminer le mercure par réaction avec de la poussière de zinc ou précipitation sous forme de cinabre (HgS) avant d'être finalement envoyés vers une unité de traitement des effluents. Le sulfure de mercure peut être récupéré lors du procédé primaire.

7.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêter une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production de mercure : vapeurs de mercure, poussières, fumées, odeurs, SO₂, autres gaz acides, eaux usées, résidus tels que les boues, les poussières sous filtre et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementales en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de

la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales présentées dans cette section sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les meilleures techniques disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par des matières organiques.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; par exemple, certains procédés sont plus faciles à effectuer de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux à faible teneur en métal et permettent donc de minimiser l'impact environnemental en empêchant leur rejet.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les matières premières disponibles sur le site et la capacité de traitement de l'installation – autant d'aspects spécifiques à un site donné.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées ?
- La nature de la charge et des autres métaux qu'elle contient a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?

- Le procédé est-il compatible avec les techniques le plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les d'émissions atteignables sont présentés plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » ; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur des MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeur qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un process ou d'un lot. Les d'émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local. Les exemples fournis dans la section consacrée aux techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD présentent les concentrations associées à certains procédés existants [tm 137 Copper Expert Group 1998].

Les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques utilisés à l'heure actuelle constituent la base des MTD ; ils doivent être appliqués en combinaison avec les facteurs décrits dans le Chapitre 2.

7.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions relatives aux meilleures techniques disponibles en termes de stockage et de manutention des matériaux figurant dans la section 2.17 de ce document sont applicables aux métaux du présent chapitre. En outre, du fait de la tension de vapeur du mercure, le stockage des produits dans des récipients hermétiques et isolés est considéré comme une MTD.

7.4.2 Choix du procédé

Dans le cas de la production de mercure primaire à partir de cinabre, l'utilisation d'un four Herreschoff représente la MTD. En revanche, pour les autres filières de production (à partir des systèmes de traitement des gaz employés pour les autres métaux non-ferreux ou à partir de matières premières secondaires), il est impossible de conclure que seul un procédé de production constitue la MTD.

7.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les systèmes de collecte des fumées utilisés peuvent tirer parti de dispositifs de mise en étanchéité des fours et être conçus de façon à y maintenir une dépression appropriée afin d'éviter les fuites et les émissions fugitives.

Les meilleures techniques disponibles concernant les dispositifs de traitement des gaz et des fumées sont celles qui reposent sur les MTD pour l'élimination du mercure, décrites dans la section 2.17. A l'heure de la rédaction du présent document, les performances des procédés utilisant un épurateur sont encore incertaines pour ce qui concerne les particules fines de mercure. Il est conclu que ces techniques pour cette application doivent donc faire l'objet d'une étude supplémentaire avant de pouvoir confirmer quelles sont les MTD et leurs niveaux d'émissions associés. Lors des étapes de procédé générant des poussières, l'utilisation d'un filtre à manches représente la MTD. Il est possible d'utiliser des filtres à manches constitués de matériaux haute performance modernes associés à une structure bien conçue et convenablement entretenue. Ces filtres comportent des systèmes de détection de rupture de sac et des méthodes de décolmatage en ligne.

Les systèmes de récupération du soufre et les étapes de récupération des poussières et des métaux associées sont ceux présentés dans la section 2.8 de ce document.

Les systèmes de collecte des fumées doivent être conformes aux meilleures pratiques évoquées dans la section 2.7. Le tableau suivant énumère les systèmes de dépollution considérés comme MTD pour les constituants susceptibles d'être présents dans les effluents gazeux. La nature variable des matières premières utilisées peut avoir une influence sur le panel de constituants ou l'état physique de certains d'entre eux (granulométrie et propriétés physiques des poussières formées, par ex.) ; ces variations doivent être évaluées au niveau local.

Étape du procédé	Option de dépollution	Composé dans les effluents gazeux
Broyage et transport du minéral	Collecte des poussières et filtre à manches	Poussières
Manutention des matières premières secondaires	Manutention en enceinte fermée, épuration des gaz de ventilation	Poussières, vapeurs de mercure, mercure libre et matières sèches
Grillage primaire ou secondaire	Condensation et épuration du mercure* ; élimination du SO ₂	Poussières, SO ₂ , vapeurs de mercure ou brouillard (dépend de la collecte des gaz provenant des fours et des condenseurs)
Manutention du produit	Distributeur en enceinte fermée ; épuration des gaz de ventilation	Vapeurs de mercure (dépend de la collecte des gaz provenant des fours et des goulottes de coulée)
Note : * Les données indiquent que le mercure contenu dans les gaz de condensation émis lors de la transformation du cinabre se présente sous la forme de fines particules difficiles à éliminer au moyen des procédés traditionnels. Il a été conclu qu'une étude supplémentaire est nécessaire pour obtenir des données fiables.		

Tableau 7.5 : Résumé des différentes méthodes de dépollution applicables aux constituants des effluents gazeux

7.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

Lorsqu'elles sont combinées de façon appropriée, les techniques énumérées ci-dessus permettent d'empêcher les émissions dans l'environnement. Pour l'ensemble des procédés, les émissions totales dans l'air comprennent celles provenant :

- des étapes de manutention et de stockage, de séchage, d'agglomération, de frittage, de grillage et de fusion des matériaux ;

- des étapes d'affinage, de distillation et de conditionnement.

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/Nm ³	Filtre à manches	Un électrofiltre humide peut être utilisé pour traiter les gaz formés lors de la granulation du laitier.
SO ₂	50 – 200 mg/Nm ³	Épurateur par voie humide ou semi-sèche et filtre à manches	La concentration et la température des gaz bruts peuvent varier largement au cours du procédé, et affecter la teneur finale en SO ₂ .
Mercure	À déterminer	À déterminer	Une investigation est nécessaire afin de déterminer les techniques les plus efficaces en présence de particules de mercure formant un brouillard fin.
Note : Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage. S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.			

Tableau 7.6 : Émissions dans l'air générées par le broyage des minerais, le grillage, la distillation et les procédés associés de production primaire de mercure

Polluant	Plage d'émissions associée à l'application des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Mercure	0,02 mg/Nm ³	Épuration du mercure (procédé Boliden, utilisation de thiosulfate, etc.)	
Note : Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période d'exploitation. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage. S'agissant des systèmes de dépollution utilisés, les caractéristiques des gaz et des poussières seront prises en compte pour la conception du système et une température de fonctionnement correcte sera utilisée.			

Tableau 7.7 : Émissions dans l'air générées par la production à partir de matières premières secondaires et de métaux communs associées à l'utilisation des MTD dans le secteur du mercure

Les techniques permettant d'éliminer les fines particules de mercure contenues dans les effluents gazeux venant des condenseurs doivent faire l'objet d'une étude et d'un rapport.

Les émissions fugitives sont très importantes ; il est possible d'établir des prévisions en s'appuyant sur l'efficacité de captage des fumées et en effectuant une surveillance de l'environnement (voir la section 2.7).

7.4.4 Eaux usées

Les émissions dans le milieu aquatique proviennent de la purge des systèmes d'épuration et de refroidissement.

Les eaux usées sont neutralisées à l'aide de soude caustique puis traitées avec du sulfure de sodium pour précipiter le sulfure de mercure. Les effluents passent dans un filtre à charbon actif avant d'être rejetés [tm

70, Mercury Expert group 1998]. Le niveau d'émissions dans l'eau atteignable est inférieur à 50 parties par milliard de mercure.

7.4.5 Résidus de procédé

La roche grillée exempte de mercure sert à construire des routes. Les autres matières premières qui ont été grillées pour éliminer le mercure (batteries, par ex.) sont utilisées dans les procédés de récupération des métaux précieux.

Les boues générées lors du traitement des eaux usées intégré à la production primaire ou secondaire contiennent du sulfure de mercure ou du calomel. Dans le cas de la production primaire, ce matériau est aggloméré puis renvoyé dans le four afin de récupérer le mercure. Cela n'est pas toujours possible dans le cas de la production secondaire, où de petites quantités sont rejetées.

7.5 Techniques émergentes

Un procédé intégré à la production de mercure primaire est actuellement à l'étude ; cette technique devrait permettre de récupérer le mercure éliminé des procédés dans lesquels il est remplacé par d'autres matériaux. Ce développement inclura un système de dépollution des fines particules de mercure et cette technique sera applicable dans le cadre de la production de mercure primaire. A l'heure de la rédaction du présent document, les détails de ce procédé ne sont pas disponibles.

8 METAUX REFRACTAIRES

Les métaux réfractaires sont des métaux à points de fusion élevés qui sont également caractérisés par d'autres propriétés physiques et chimiques spéciales, telles qu'une forte densité, une stabilité chimique, une résistance à la corrosion et aux acides, etc. Le zirconium a même la capacité de capter les neutrons lents, ce qui lui donne un rôle important dans la construction des réacteurs nucléaires. On produit les métaux réfractaires tant sous la forme de lingot de métal (lours) au moyen des fours à bombardement électronique que sous la forme de poudre de métal servant de matière première pour des traitements métallurgiques des poudres tels que la compression et le frittage.

8.1 Procédés et techniques appliqués

Les sections suivantes définiront les procédés et les technologies appliqués pour la production des métaux réfractaires les plus courants et les plus importants. La production des ferroalliages, qui normalement contiennent les mêmes métaux, sera examinée en détail dans le chapitre suivant de ce document.

8.1.1 Chrome

Outre son utilisation comme élément d'alliage dans l'industrie de l'acier, le chrome est également très utilisé dans d'autres secteurs industriels. Dans l'industrie chimique, par exemple, il est nécessaire en grandes quantités pour fabriquer les pigments que l'on utilise pour produire les peintures et les encres. On utilise une autre quantité considérable de chrome comme garnissage protecteur électroplqué, car ce métal est résistant à la corrosion face à diverses matières corrosives à la température ambiante.

On peut élaborer le chrome soit à partir de concentrés et de minerai de chromite par réductions carbo- et métallo-thermiques, soit par électrolyse à partir d'acide chromique. Pour obtenir de l'acide chromique, on grille le minerai de chromite avec du carbonate de sodium, ceci étant suivi d'un procédé de lixiviation avec de l'acide sulfurique pour produire du chromate de sodium qui peut ensuite être transformé en acide chromique.

8.1.1.1 Production de chrome par réduction métallothermique

Dans le procédé thermique, on utilise du carbone, du silicium ou de l'aluminium comme agent réducteur. La charge est automatiquement pesée et chargée dans une benne au niveau d'un poste de pesage informatisé. Au niveau de ce poste, on utilise diverses techniques de dépollution visant à empêcher les émissions dans l'atmosphère. Une fois le chargement terminé, la benne est amenée dans une salle fermée afin d'en mélanger le contenu. Pour réduire les poussières au minimum sur le lieu de travail, on maintient une pression négative au moyen du ventilateur à l'intérieur de la salle où est effectué le mélange, qui dirige l'air au travers d'un élément filtrant avant l'évacuation dans l'atmosphère. Finalement, la benne est placée sur une plateforme d'alimentation automatique au niveau de l'atelier de cuisson.

On prépare la cuve de cuisson en serrant du sable réfractaire autour d'un gabarit central. Le sable d'une trémie de stockage est acheminé par l'intermédiaire d'un "projeteur de sable" et mélangé avec de l'eau. On fait ensuite vibrer le pot afin de comprimer le sable. La trémie d'alimentation est équipée d'un élément de filtration et d'extraction des poussières monobloc.

Après le serrage de la cuve de cuisson, la surface intérieure est revêtue d'une solution de liant faible et séchée sous une hotte chauffée au gaz avant d'être transférée au atelier de cuisson. Les fumées de

combustion qui s'échappent de la hotte de séchage sont émises à l'atmosphère par l'intermédiaire d'une cheminée en exploitant la convection naturelle.

La cuve de cuisson est située à l'intérieur d'une chambre de cuisson, qui comporte une hotte mobile pour capter les fumées, et une goulotte d'alimentation intégrée au-dessus d'elle. Le mélange des matières premières est introduit automatiquement à vitesse régulée dans la cuve de cuisson, où la réaction exothermique a lieu. La fumée dégagée par la réaction est dirigée vers l'installation de filtres à manches principale. Après diminution du dégagement de fumée, un moins grand volume d'extraction est fourni à la chambre de cuisson.

Une fois le métal solidifié après la réaction, on enlève la cuve de cuisson et on le transfère vers un convoyeur refroidisseur au moyen d'un engin de levage. Celui-ci est en partie fermé par une hotte et est ventilé par un certain nombre de ventilateurs d'extraction, qui procèdent à l'évacuation dans l'atmosphère en dehors du bâtiment. Des panneaux filtrants en fibres de verre jetables protègent les entrées des ventilateurs.

Lors de son enlèvement du convoyeur refroidisseur (au moyen d'un engin de levage), la cuve de cuisson est placée sur un chariot de démoulage afin d'être transférée à une cabine de démoulage. Dans cette cabine fermée, la carcasse du pot est séparée du laitier/métal solidifié par hissage. Les débris provenant du garnissage intérieur du pot tombent dans une trémie et sont transférés à un crible vibreur. Des éléments d'extraction de type cartouches filtrantes régulent les émissions pendant ces opérations.

La carcasse de la cuve de cuisson et le métal/laitier démoulés sont récupérés au moyen du chariot de démoulage. La carcasse de la cuve de cuisson est séparée et renvoyée au poste de préparation de pot afin d'être réutilisée. Le laitier est séparé du 'loup' de chrome et envoyé à une zone de stockage avant expédition. Le loup est soulevé du chariot de démoulage par un engin de levage et transféré à une cuve où on utilise de l'eau pour ramener la température du loup en dessous de 100°C. L'extraction de la vapeur générée par le refroidissement à l'eau se fait à l'aide d'un ventilateur et de tuyauteries qui l'évacuent dans l'atmosphère en dehors du bâtiment.

Après son refroidissement, le loup de métal est transféré vers d'autres départements du site pour y subir nettoyage, cassure, concassage et broyage afin d'obtenir la taille de produit souhaitée. Le conditionnement du matériau est réalisé conformément aux exigences du client et des conteneurs souples, des fûts et des sacs en plastique peuvent être utilisés. Un schéma du procédé de production de chrome thermique est présenté sur la figure suivante.

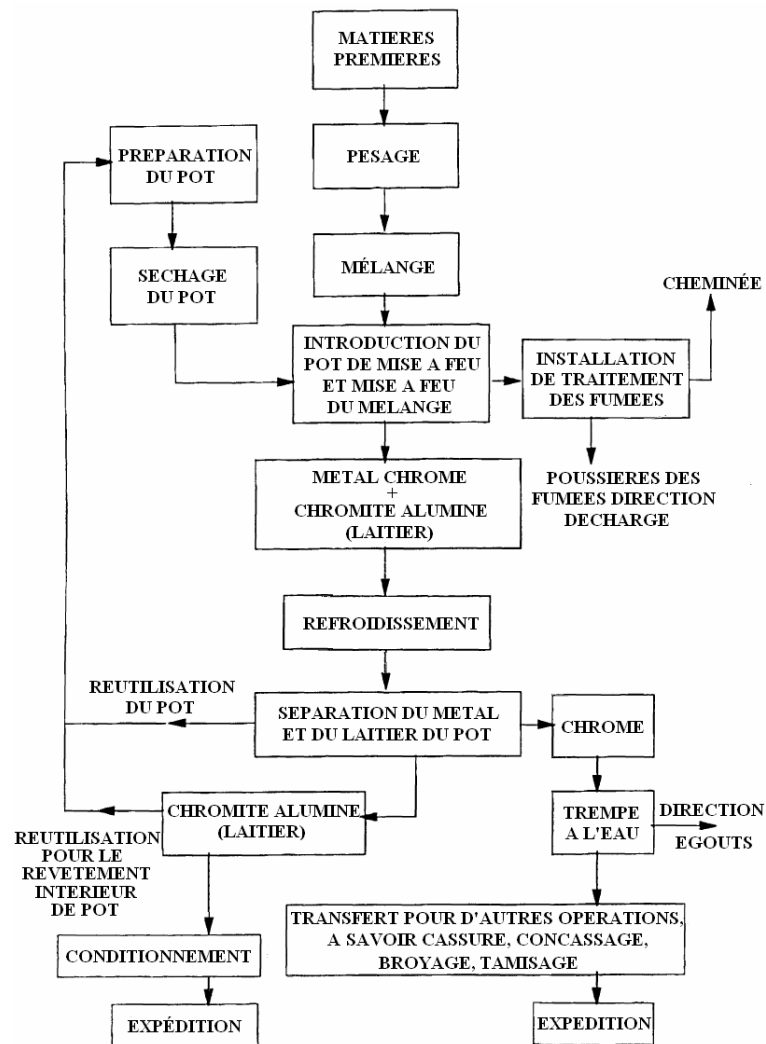


Figure 8.1: Production de chrome par le procédé métallothermique [FIGURE : reprendre erreurs du texte]

La réduction silico-thermique n'est pas suffisamment exothermique pour être auto-entretenue et elle doit donc être réalisée dans un four à arc électrique. Si on utilise le procédé carbo-thermique, l'oxyde de chrome sera réduit par le carbone dans un four à arc électrique. Le chrome produit par ce procédé contient de grandes quantités de carbone.

8.1.1.2 Production de chrome par électrolyse

Dans le procédé électrolytique, on utilise normalement du ferro-chrome à haute teneur en carbone comme charge que l'on convertit ensuite en alun de chrome par dissolution avec de l'acide sulfurique à des températures à environ 200°C. Après plusieurs étapes du procédé utilisant cristallisation filtration vieillissement, une deuxième filtration et une opération de clarification, l'alun devient l'électrolyte pour une cellule à diaphragme. Le procédé est très sensible, à un certain nombre de paramètres toutefois, les plus importants étant le pH, les températures du catholyte, la remise en circulation et la densité du catholyte, la densité de courant et la préparation de la cathode [tm 8 HMIP 1993]. Le tableau suivant présente un schéma du procédé électrolytique utilisant le ferro-chrome comme matière première.

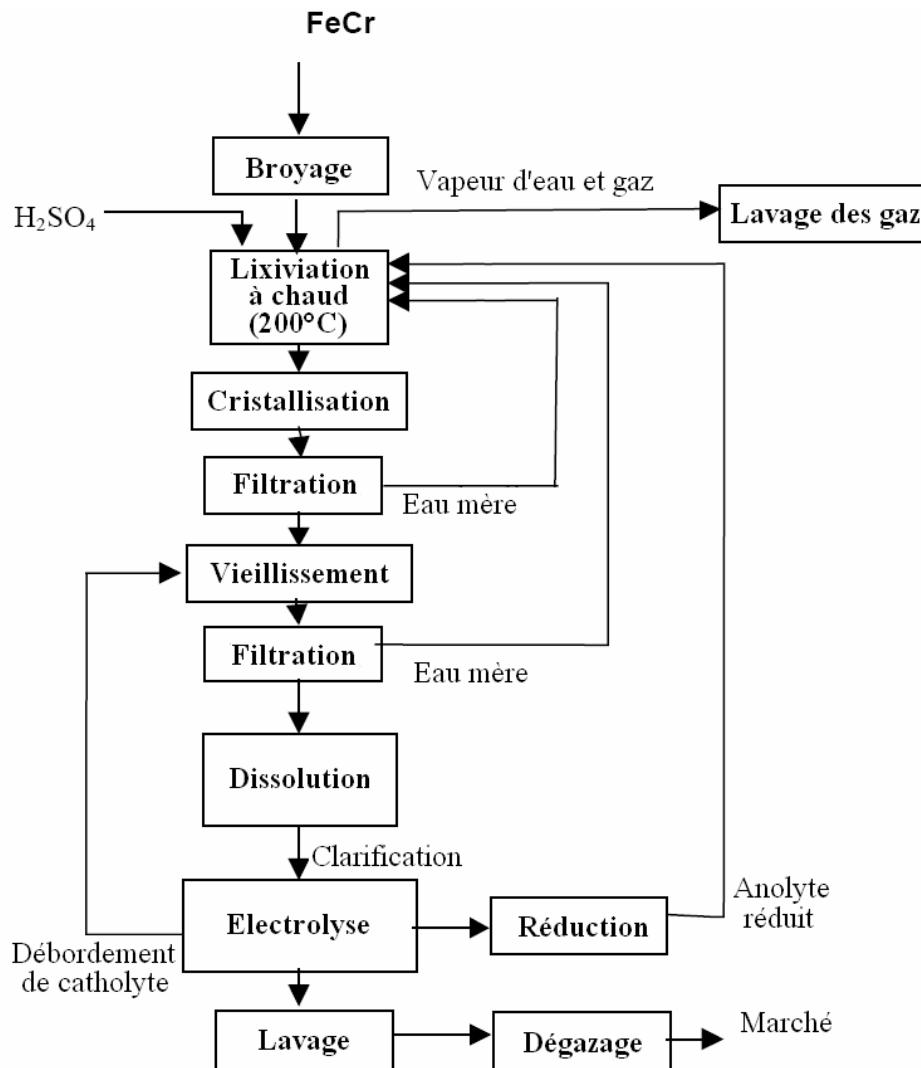


Figure 8.2: Production de chrome par électrolyse

L'étape de dégazage supplémentaire est nécessaire car la teneur en carbone du chrome électrolytique est parfois trop élevée pour les applications industrielles en aval. Le chrome métal est refroidi et est réduit en fragments au moyen d'un marteau avant le concassage et la mise en fûts. Le laitier produit peut être réutilisé sous la forme d'un garnissage réfractaire ou être vendu comme matériau abrasif ou réfractaire.

8.1.2 Manganèse

Ce métal est principalement utilisé dans l'industrie du fer, de l'acier et de l'aluminium. Dans la production d'aluminium, par exemple, on utilise du manganèse comme élément d'alliage améliorant la dureté des produits. Pour produire du manganèse pur, plusieurs procédés sont connus [tm 107 Ullmanns 1996] :

- électrolyse de sels de manganèse en solution aqueuse,
- décomposition électrothermique de minerais de manganèse,
- réduction silico-thermique de laitier ou de minerais de manganèse,
- réduction alumino-thermique de laitier ou de minerais de manganèse,

- distillation de ferro-manganèse,
- électrolyse de sels fondus.

Parmi les procédés énumérés ci-dessus, les deux premiers sont les plus importants. Les autres ne sont pas importants sur le plan économique.

8.1.2.1 Electrolyse de sels de manganèse en phase aqueuse

La production de manganèse par l'électrolyse de sels de manganèse aqueux réclame tout d'abord un broyage du minerai de manganèse. Le broyage augmente la surface active et assure une réactivité suffisante tant lors de l'étape de réduction que lors de l'étape de lixiviation ultérieure. Après le broyage, le minerai de manganèse est amené à un four de grillage rotatif où la réduction et la calcination ont lieu. Ce procédé est réalisé à environ 850 – 1000°C dans une atmosphère réductrice. Comme agent réducteur, on peut utiliser plusieurs sources de carbone, par exemple de l'anthracite, du charbon, du charbon de bois et du fuel ou du gaz naturel. Le minerai calciné doit être refroidi en-dessous de 100°C afin d'éviter une autre réoxydation.

Le procédé de lixiviation ultérieur est réalisé avec un électrolyte recyclé, principalement de l'acide sulfurique. Après la lixiviation et la filtration, le fer présent est séparé de la solution par une précipitation par oxydation et le nickel et le cobalt sont séparés par une précipitation de sulfure. L'électrolyte purifié est ensuite traité avec du SO₂ afin d'assurer le placage de γ -Mn pendant l'électrolyse. L'électrolyse est réalisée dans des cellules à diaphragme [tm 8 HMIP 1993]. La cathode est normalement faite en acier inoxydable ou en titane. Pour l'anode, on peut utiliser un alliage plomb-calcium ou plomb-argent. Après écoulement d'un temps de réaction approprié, les cathodes sont retirées du bain d'électrolyse. Le manganèse qui s'est déposé sur la feuille de départ cathodique est arraché mécaniquement et est ensuite lavé et séché. Le métal est concassé pour produire des paillettes ou de la poudre de métal ou bien il est transformé en granulés, en fonction de l'utilisation finale.

8.1.2.2 Décomposition électrothermique de minerais de manganèse

Le procédé électrothermique est le second procédé important pour produire du manganèse à une échelle industrielle. Le procédé électrothermique se déroule sous la forme d'un procédé comportant plusieurs stades. Lors du premier stade, le minerai de manganèse est fondu avec seulement une petite quantité de réducteur afin de réduire surtout l'oxyde de fer. Un ferromanganèse de qualité inférieure est ainsi produit ainsi qu'un laitier riche en oxyde de Mn. On fait ensuite fondre le laitier lors du second stade avec du silicium afin de produire du silicomanganèse. Le silicomanganèse fondu peut être traité avec le laitier liquide du premier stade pour obtenir du manganèse relativement pur. Pour la dernière étape, on peut utiliser une poche ou une poche à secousses. Le manganèse métal produit par le procédé électrothermique contient jusqu'à 98 % de Mn.

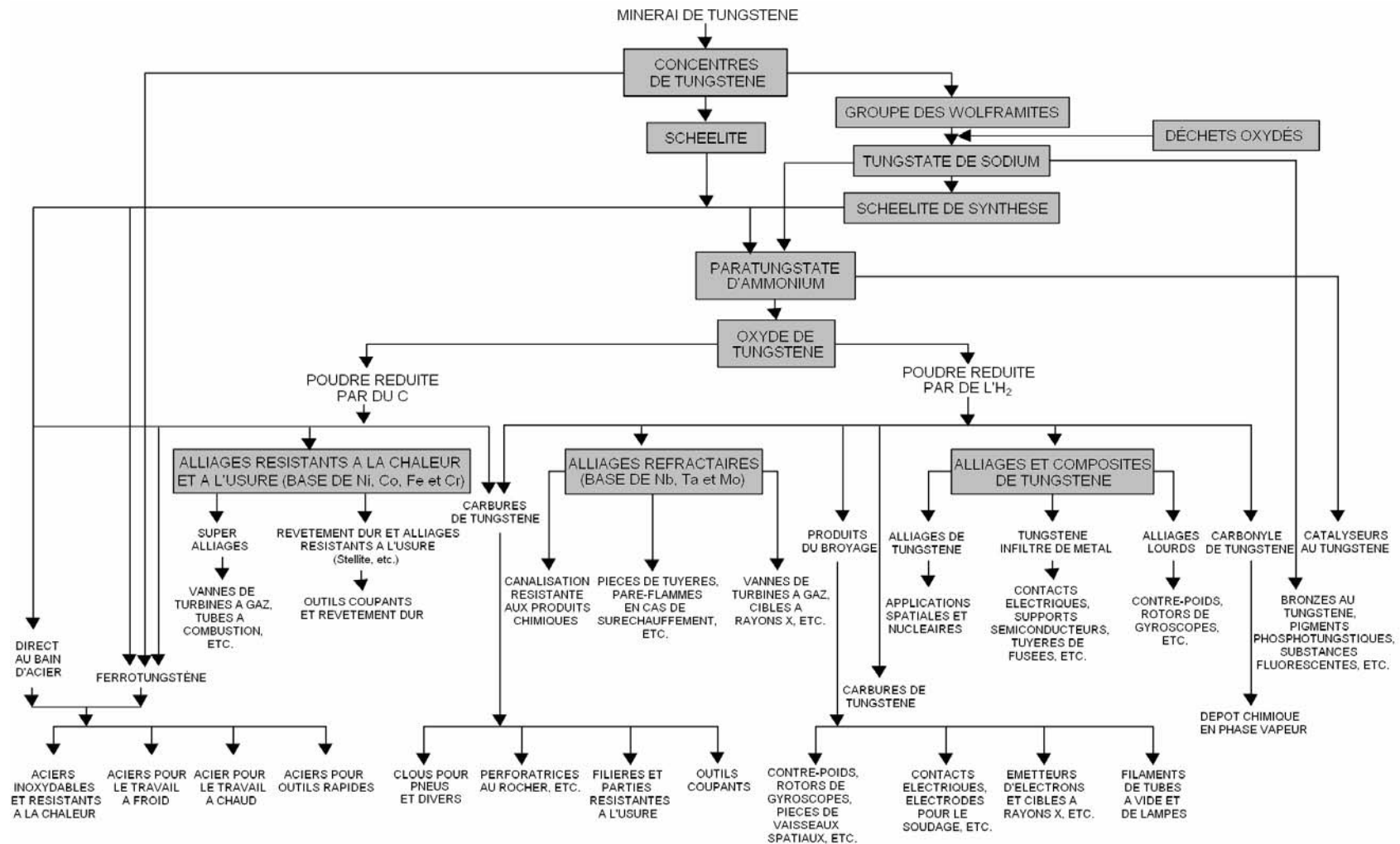
8.1.3 Tungstène

Le tungstène est le métal réfractaire qui présente le point de fusion le plus élevé, ce qui est dû à l'énergie de liaison extrêmement élevée. Ceci conduit par conséquent à d'autres propriétés étendues, telles qu'une très faible pression de vapeur, compressibilité et dilatation thermique.

On utilise le tungstène pour un grand choix d'applications industrielles différentes. Selon la quantité de métal requise, on utilise le tungstène principalement pour produire du métal dur et de la poudre de carbure métallique que l'on peut ensuite traiter par des procédés de métallurgie des poudres afin de produire des outils en métal dur. On utilise également le tungstène en très grandes quantités comme élément d'alliage

dans l'industrie de l'acier. Un autre domaine principal est l'utilisation du tungstène comme élément d'alliage avec d'autres métaux non-ferreux et comme composés de tungstène dans l'industrie chimique.

Le point de fusion élevé du tungstène exclut l'utilisation des techniques de fonte. Les concentrés et les minerais enrichis sont donc traités par hydrométallurgie en utilisant une digestion acide ou alcaline pour produire un sel intermédiaire chimiquement raffiné. Celui-ci est ensuite calciné en oxyde et réduit en poudre de métal. Des techniques de la métallurgie des poudres, en particulier la compression et le frittage, sont ensuite employées, ceci étant suivi d'une gamme de procédés de fabrication comprenant l'extrusion, le forgeage et le laminage. La carburation de la poudre de métal pour former du carbure de tungstène peut être encore plus cémentée avec du cobalt pour former du métal dur [tm 8 HMIP 1993]. Du fait des matières premières disponibles, le tungstène peut être élaboré à partir de matériaux soit primaires, soit secondaires. Un schéma type de procédé pour le tungstène est présenté sur la figure suivante.



8.1.3.1 Production de poudre de tungstène à partir de matière première primaire

La première étape de la production de tungstène, que l'on réalise en principe directement au niveau du site minier, consiste à concasser et à broyer la matière première afin de libérer le minéral de tungstène de la gangue. Le stade suivant est la production de paratungstate d'ammonium (APT) par des procédés hydrométallurgiques.

Les concentrés de Scheelite et de Wolframite que l'on utilise la plupart du temps sont dissous par lixiviation sous pression pour produire une solution de sodium-tungstène. Le procédé de lixiviation dissout également d'autres éléments tels que les silicates, le thiomolybdate ainsi que des éléments comme l'As, le Sb, le Bi, le Pb et le Co qui doivent être séparés de la solution par purification. Le thiomolybdate peut ensuite servir à la production de molybdène. La solution de tungstate de sodium purifiée est ensuite convertie en solution de tungstate d'ammonium. La conversion de la solution de tungstate de sodium peut être réalisée soit par une extraction par solvant, soit par un procédé d'échange d'ions. Lors de l'étape de cristallisation ultérieure, de l'eau et de l'ammoniaque sont distillées. Pendant le déroulement de la distillation, la valeur du pH diminue et le PTA se sépare de la solution par cristallisation. Le PTA solide est ensuite calciné de façon ordinaire dans un four de séchage rotatif afin d'obtenir des oxydes de tungstène.

Les deux formes oxydées utilisées pour la production de poudre de tungstène sont les oxydes jaune et bleu (WO_3 et W_4O_{11}). On produit l'oxyde jaune en chauffant le PTA dans l'air à des températures au-dessus de 250°C . On peut produire l'oxyde bleu si l'étape de calcination est réalisée en l'absence d'air à des températures de 400 à 800°C . On préfère généralement la production d'oxyde bleu car une plus petite quantité d'agent réducteur est alors nécessaire au stade de réduction ultérieur.

La réduction des oxydes de tungstène (oxyde bleu ou jaune de tungstène) en poudre de tungstène se réalise en principe de nos jours par réduction à l'hydrogène. Pour cette réduction, on utilise soit un four rotatif, soit un four à poussoir, dans ce dernier cas la poudre passant à travers le four dans des nacelles. De nos jours, on utilise également des fours modernes à bande automatisée pour la production de poudre de tungstène. L'hydrogène traverse le four à contre-courant par rapport aux oxydes, de la vapeur d'eau se forme lors du procédé de réduction dans le four. L'hydrogène est en partie remis en circulation. Les éventuelles poussières qui apparaissent sont récupérées par exemple au moyen d'un filtre à manches, d'un laveur humide ou d'un équipement similaire. Les paramètres importants du procédé sont la température du four, la quantité d'oxydes chargée au niveau du four par unité de temps, la vitesse de circulation de l'hydrogène et la profondeur et la porosité du lit ou de la nacelle. Le procédé de production de poudre de tungstène est présenté sur la figure suivante.

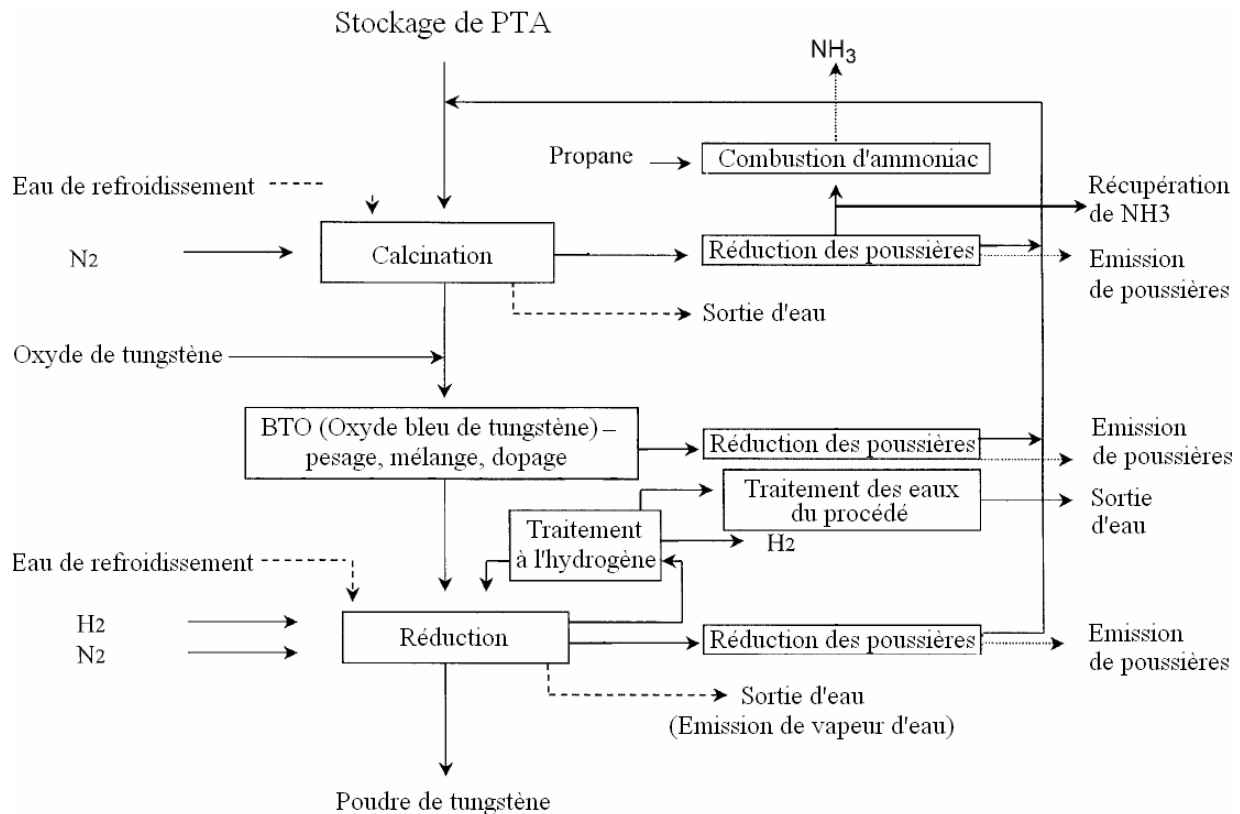


Figure 8.4 : Production de poudre de tungstène

[tm 182, ITIA 1999]

La majeure partie de la poudre de tungstène est convertie en carbure de tungstène. La poudre de tungstène est mélangée à du noir de carbone en un rapport donnant le monocarbure après la réaction. On peut utiliser un four à poussoir ou un four discontinu pour la carburation.

- **Four à poussoir** : le mélange de W et de C est chargé dans des nacelles ou dans des creusets en graphite et passe à travers le four en continu. On utilise de l'hydrogène en tant que gaz protecteur et celui-ci traverse le four à contre-courant et est éliminé par brûlage par torchère après la sortie au moyen d'une torchère au propane à titre de régulation de l'inflammation. Les fours sont chauffés à l'électricité et fonctionnent dans le domaine de température de 1100 - 2000°C.
- **Fours discontinus** : le mélange de W et de C est chargé dans des cylindres en papier ou dans un autre récipient approprié et densifié par piquée. Le matériau est chauffé par induction dans un serpentin refroidi à l'eau, avec de l'hydrogène en tant qu'gaz protecteur. L'hydrogène est éliminé par brûlage par torchère lorsqu'il quitte le four. Le procédé a lieu à un domaine de température de 1800 – 2000°C.

Le procédé de carburation de la poudre de tungstène est présenté sur le schéma suivant.

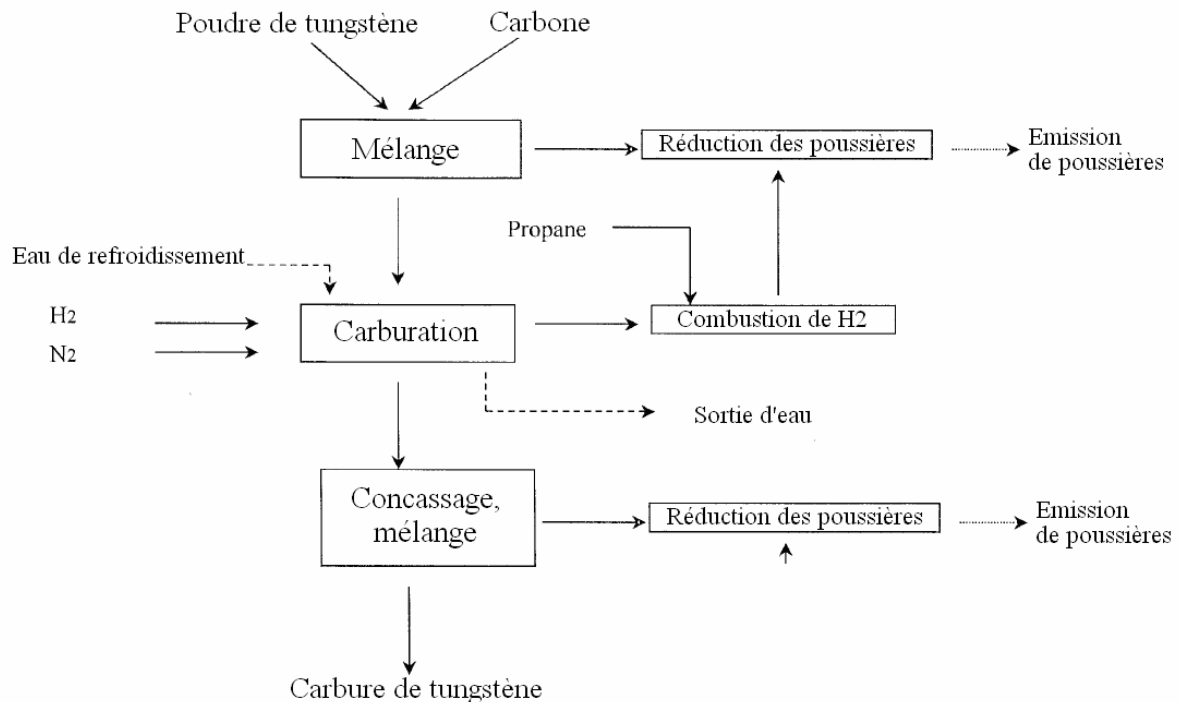


Figure 8.5 : Production de carbure de tungstène

[tm 182, ITIA 1999]

8.1.3.2 Transformation de la matière première secondaire du tungstène

La disponibilité croissante de déchets du tungstène provenant de diverses sources a conduit à la mise au point de divers procédés de transformation de la matière première secondaire du tungstène (déchets de métal dur du tungstène). Les trois principaux procédés pour le recyclage des déchets du tungstène (carbure de tungstène qui contient du cobalt en tant que liant) sont le procédé Goldsteam, le procédé au zinc et le procédé Leach-Milling [tm 8 HMIP 1993].

Dans le **procédé Goldsteam**, le carbure réduit en fragments est porté dans un flux d'air à grande vitesse et heurte une cible stationnaire. L'impact à des températures en dessous de la température ambiante crée un refroidissement adiabatique et casse les carbures fragilisés. Les produits sont classifiés pneumatiquement et les fines sont recueillies, les plus grosses étant remises en circulation. Le procédé est limité dans son application avec le métal dur étant donné que des teneurs en cobalt très élevées rendent le matériau ductile, bien que ceci puisse être atténué par un préchauffage et par une trempe rapide du métal dur.

Dans le **procédé au zinc**, les déchets entrent en contact avec du zinc fondu qui forme un amalgame avec le cobalt et désagrége efficacement le carbure cémenté. Après la pleine pénétration des déchets, le zinc est enlevé par distillation sous vide, laissant le métal dur sous la forme d'un matériau spongieux que l'on peut facilement concasser. Après concassage, broyage et tamisage, la poudre peut être utilisée comme matière première dans la fabrication d'une poudre calibrée, prête à être comprimée. Les limites du procédé reposent sur la taille des morceaux à retraiter et sur la nécessité d'une double distillation du zinc. Le procédé au zinc se déroule de façon discontinue, avec les déchets et le zinc placés dans un réacteur ou dans des creusets en graphite. Au bout d'approximativement 12 heures à 900°C, on réduit la pression et on distille le zinc, ce qui réclame normalement 15 heures de plus.

Dans le procédé de "**Leach-Milling**" (lixiviation-broyage), les morceaux de déchets sont lixiviés avec des lots d'acide minéral dans un broyeur ayant un garnissage intérieur. La réaction de dissolution du cobalt est lente et le carbure récupéré présente une forte teneur en oxygène indésirable. Un procédé supplémentaire pour récupérer le cobalt est nécessaire, et le procédé trouve de nos jours peu d'utilisation dans les installations modernes.

Les déchets de carbure cimenté contaminés, les tournures, les copeaux de broyage et les déchets de poudre sont oxydés et transformés chimiquement en PTA d'une façon similaire à celle utilisée pour le traitement des minerais de tungstène. S'ils sont présents, le cobalt, le tantale et le niobium sont récupérés dans des chaînes de procédé séparées.

8.1.4 Vanadium

En général, on utilise le vanadium sous la forme d'un composant d'alliage pour la production de l'alliage de fer et de vanadium appelé ferrovanadium. Le développement de la technologie du vanadium a commencé au début des années 50 de façon effective et concernait essentiellement le ferrovanadium et certains composés du vanadium. Une autre application métallurgique majeure importante a été mise au point dans les années 50. Le vanadium est devenu le constituant fondamental des alliages de titane à plusieurs composants destinés aux applications aérospatiales. On peut trouver le principal potentiel et les principales applications des alliages dans les réacteurs nucléaires et les supraconducteurs. L'utilisation du vanadium dans l'industrie chimique est fondée sur les propriétés de celui-ci, en particulier sur son changement d'états d'oxydation dans les sels de vanadium. Le comportement le plus important des composés du vanadium dans l'industrie chimique peut donc être exploité dans les catalyseurs de procédés clés, tels que la production d'acide sulfurique, d'EPDM, d'acide adipinique (nylon), maléinique ou phtalique. De plus, les oxydes de vanadium, en tant que composant actif dans les catalyseurs DeNO_x , ont été utilisés pour la réduction des oxydes d'azote dans la régulation des émissions des centrales électriques (installations d'incinération). Les nouveaux développements des sels de vanadium sont concentrés dans la production de variantes de pigments jaunes et orange destinées à remplacer les pigments à base de chrome critiques sur le plan écologique.

8.1.4.1 Production de vanadium à partir de matière première primaire

On produit la plus grande partie du vanadium utilisé de nos jours à partir du laitier au vanadium que l'on obtient d'un procédé de préréduction de minerai de titanomagnétite dans un four à arc électrique. Le four à arc électrique produit de la fonte qui est oxydée davantage dans un convertisseur à oxygène afin de transférer le vanadium dans le laitier. On utilise ensuite le laitier contenant du vanadium comme principale source mondiale de matière première pour produire l'oxyde de vanadium, qui peut ensuite être transformé par réduction en métal vanadium, en particulier en alliages contenant du vanadium.

Lors de la première étape du procédé, le laitier au vanadium est broyé et libéré des granulés de fer. Après le broyage, les sels de métaux généralement alcalins sont mélangés et chargés dans un four à soles multiples ou dans un four de grillage rotatif où le grillage, une désintégration du laitier dans des conditions oxydantes, a lieu à environ 700 – 850°C. Par conséquent, on peut réussir à obtenir à la fois l'oxydation du vanadium en V(V) et la formation d'un sel hydrosoluble. Par la suite, le laitier au vanadium grillé est lixivié pour former une phase liquide contenant du vanadium très concentré. La séparation du vanadium de la phase liquide et sa purification peuvent généralement être effectuées par la précipitation d'un vanadate contenant de l'ammonium en ajustant la valeur du pH et la température. Le précipité que l'on obtient est filtré, séché et peut sinon être transformé par plusieurs étapes de procédé en oxydes de vanadium de grande pureté, tels que le pentaoxyde de vanadium, le tétraoxyde de vanadium ou le trioxyde de vanadium en fonction de la température et des conditions de réduction/oxydation.

Pour obtenir du métal vanadium, on peut traiter les oxydes de vanadium par réduction soit carbothermique, soit métallothermique. La réduction carbothermique forme du vanadium à fortes teneurs en oxygène et en carbone, ce qui explique la rareté de l'utilisation de ce procédé. Le procédé le plus courant est le procédé métallothermique dans lequel on utilise du calcium ou de l'aluminium comme agent réducteur. Lorsqu'on utilise du calcium comme réducteur, la réaction a lieu dans un four sous pression fermé qui est revêtu intérieurement d'oxyde de magnésium pur. Le procédé aluminothermique au pentoxyde de vanadium exclusivement est un procédé auto-entretenu sans besoins énergétiques supplémentaires. Le procédé est réalisé dans un équipement résistant à la chaleur où un mélange de pentoxyde de vanadium de grande pureté est réduit par de la poudre d'aluminium.

La fusion dans un four à bombardement électronique permet à la fois la purification directe du vanadium métal et l'utilisation des oxydes de vanadium réduits par le procédé aluminothermique.

8.1.4.2 Procédés de fabrication de vanadium à partir de matières premières secondaires

Le vanadium est présent dans divers matériaux naturels contenant du vanadium tels que le pétrole brut ou la bauxite que l'on utilise pour la production d'alumine. Si ces sources sont utilisées pour produire de l'énergie ou comme matière première dans des procédés techniques, du vanadium est parfois transféré aux résidus, par exemple aux cendres d'une chaudière, ou à des sous-produits tels que les sels résultant de la production de l'alumine. Ces vingt dernières années, plusieurs technologies de procédé différentes ont été mises au point afin de récupérer dans ces sources de matières premières secondaires des oxydes de vanadium purifiés. La récupération de vanadium dans les déchets va parfois de pair avec la récupération d'autres métaux réfractaires, par exemple, lorsque l'on utilise des catalyseurs usagés, on peut récupérer soit du vanadium, soit du molybdène.

Des résidus tels que les catalyseurs usagés ou de l'huile contenant du vanadium peuvent être digérés avec de l'acide sulfurique et être ensuite transformés par une étape d'extraction dans une solution acide de sulfate de vanadyle. Dans l'étape suivante du procédé, la solution est traitée par oxydation et précipitation, ce qui produit un précipité appelé gâteau rouge ("red cake"), un polyvanadate de vanadium. Le gâteau rouge peut ensuite être calciné pour former du pentoxyde de vanadium alcalin.

Une autre méthode de transformation des résidus contenant du vanadium associe une méthode pyrométallurgique et une méthode hydrométallurgique. Le vanadium contenu dans les résidus est oxydé à des températures élevées afin de produire un vanadate de métal alcalin lixiviable à l'eau. Après l'étape de lixiviation, le vanadium est précipité et calciné afin de produire du pentoxyde de vanadium.

Lors de la production d'alumine, laquelle est décrite en détail dans le chapitre 4 de ce document, un sel est généré en tant que résidu ou en tant que sous-produit. Si la production d'alumine est à base de bauxite à fortes teneurs en vanadium, on peut ensuite utiliser le sel pour obtenir du pentoxyde de vanadium. Par rapport à l'autre procédé de production de pentoxyde de vanadium dans lequel on utilise du laitier au vanadium comme matière première, ce procédé pose un problème d'eaux usées parce que le sel contient également de l'arsenic qui est transporté dans la solution d'attaque et ensuite aux eaux usées.

Le pentoxyde de vanadium produit à partir d'une matière première soit primaire, soit secondaire peut être réduit par un grand choix de procédés métallurgiques différents afin de produire du vanadium métallique. Le schéma suivant met en évidence les diverses voies de production du pentoxyde de vanadium et les procédés ultérieurs pour produire du vanadium métal.

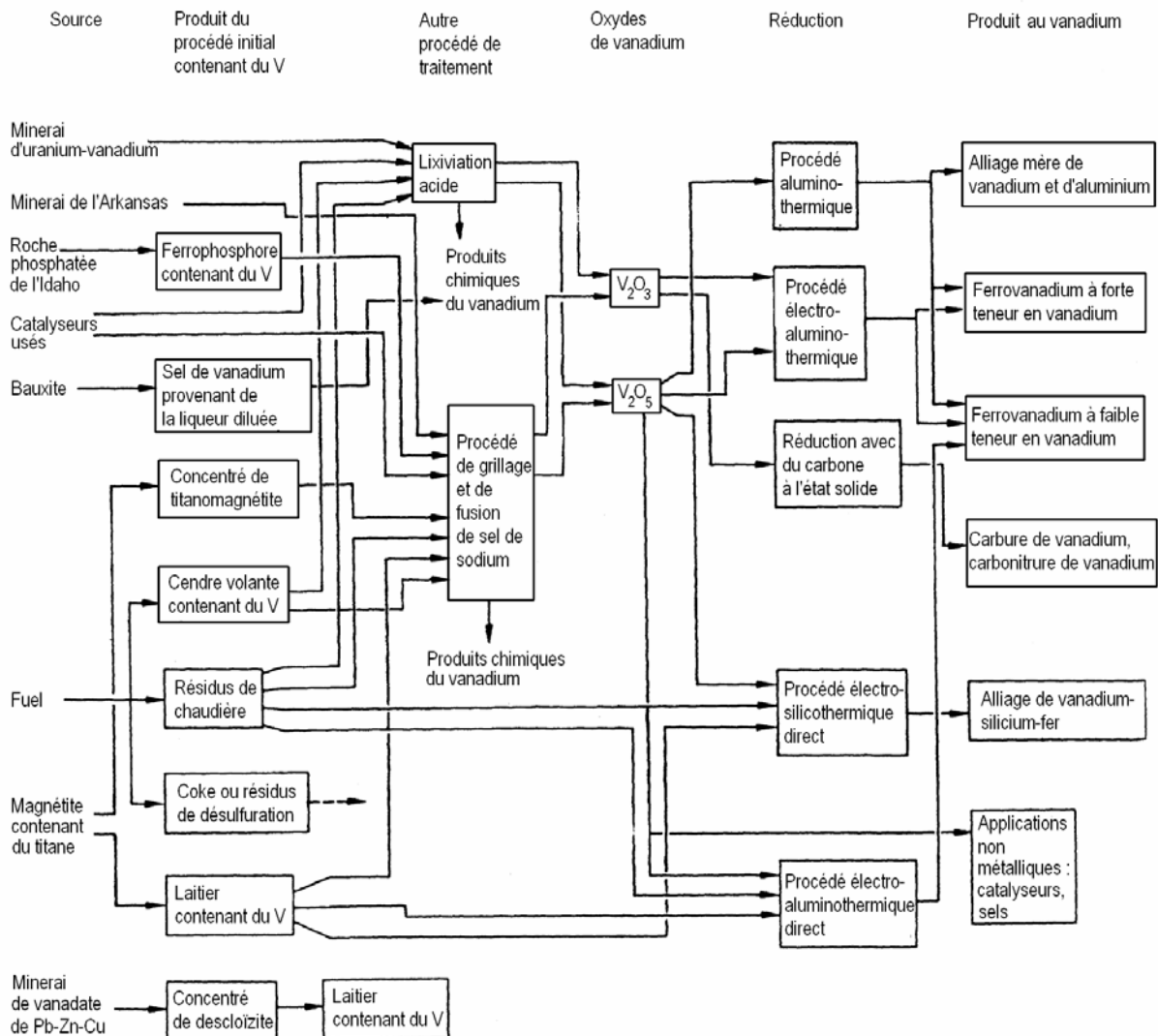


Figure 8.6 : Production de pentaoxyde de vanadium et de vanadium métall

[tm 008, HMIP 1993]

8.1.5 Molybdène

Le molybdène à son stade pur est un métal gris brillant que l'on peut utiliser pour un grand choix d'applications industrielles. L'utilisation du molybdène commence par la demande de celui-ci sous forme d'élément d'alliage dans la production de l'acier, associe l'utilisation de composés du molybdène dans l'industrie chimique et finit par un produit utilisé par les fabricants de lubrifiants.

On peut même obtenir du molybdène à partir de sources minérales primaires ou à partir de minerais secondaires ce qui signifie que du molybdène est également produit comme sous-produit par l'exploitation minière du cuivre. Tout d'abord, on broie et on fait flotter le minéral contenant du molybdène afin de séparer la molybdénite de la roche hôte. Le minéral de molybdénite est ensuite grillé pour enlever le soufre et transformer le sulfure en oxyde. Outre l'utilisation du trioxyde de molybdène (MoO_3) de qualité technique dans la production des ferroallages, c'est également le composé de départ pour tous les autres produits contenant du molybdène, tels que le dimolybdate d'ammonium, le molybdate de sodium et le

métal molybdène [tm 107, Ullmanns 1996]. La transformation du minerai de molybdénite concentré (sulfure de molybdène) en trioxyde de molybdène de qualité technique pour l'industrie métallurgique ou chimique est réalisée par calcination et grillage. Le procédé de grillage de la molybdénite est décrit en détail dans la partie traitant de la production des ferroalliages dans le chapitre 9 de ce document.

8.1.5.1 Production de poudre de molybdène métal

On peut produire de la poudre de molybdène métal par un procédé en deux étapes en réduisant le trioxyde de molybdène (MoO_3) avec de l'hydrogène. Outre le trioxyde de molybdène, on peut également utiliser des composés tels que l'hexamolybdate d'ammonium et le dimolybdate d'ammonium pour produire de la poudre. Lors de la première étape du procédé, MoO_3 est transformé, par réduction à une température d'environ 600°C dans un procédé exothermique, en dioxyde de molybdène (MoO_2). La deuxième étape de réduction, au cours de laquelle on produit la poudre de métal, a lieu à environ 1050°C . On peut réaliser le procédé soit dans un four à poussoir, soit dans un four à longerons mobiles, soit dans un four de grillage rotatif où l'hydrogène est entraîné dans un écoulement à contre-courant. Une compression et un frittage afin d'obtenir du molybdène compact peuvent ensuite être utilisés pour traiter la poudre. La fusion du molybdène dans un four à arc sous vide ou dans un four à bombardement électronique est une autre manière de produire du molybdène compact.

8.1.5.2 Procédé de fabrication de molybdène à partir de matière première secondaire

Le molybdène est utilisé à grande échelle comme catalyseur dans l'industrie pétrochimique. Les catalyseurs usagés constituent donc une source de matière première secondaire de valeur que l'on peut utiliser pour la récupération de molybdène. La récupération du molybdène et la récupération du contenu en vanadium peuvent suivre les étapes de procédé suivantes. [tm 107 Ullmanns 1996].

- Chaleur initiale dans l'air à 600°C pour éliminer le soufre, le carbone et les hydrocarbures résiduels et pour transformer les métaux par oxydation en vanadate et en molybdate solubles ;
- Une étape de lixiviation résultant en la solubilisation préférentielle du molybdate et du vanadate, laissant le nickel-cobalt-alumine sous la forme d'un solide ;
- Séparation du molybdène et du vanadium ;
- Traitement du résidu Ni-Co-alumine afin de récupérer le contenu en nickel et cobalt.

8.1.6 Titane

Le titane est utilisé dans l'industrie la plupart du temps sous la forme de dioxyde de titane (TiO_2), lequel est utilisé comme pigments dans l'industrie des peintures, des matières plastiques et du papier, et sous la forme de métal. Le métal titane, même sous la forme d'un métal pur ou d'alliages, est utilisé dans les applications où son coût relativement élevé est justifié par ses caractéristiques exceptionnelles. En raison du rapport élevé résistance/poids de ses alliages et de leur résistance à la corrosion, le titane est important et très utilisé pour les cellules et les moteurs d'avion de haute performance.

Il y a généralement deux procédés appliqués établis pour la production de titane métal. Dans le procédé Kroll, du tétrachlorure de titane (TCT) est réduit avec du magnésium fondu afin de produire du titane métal pur ainsi que de l'éponge de titane. Dans le procédé Hunter, on utilise du sodium fondu pour la réduction du TCT. Du fait de la réactivité du titane fondu, la production de lingots de titane est ensuite réalisée dans des fours spéciaux sous vide.

On peut produire du tétrachlorure de titane à partir du minerai contenant de l'oxyde de titane et à partir du laitier riche en titane qui est généré par le traitement métallurgique du minerai d'ilménite. La chloration est de nos jours exclusivement réalisée par un procédé en lit fluidisé. Le choix d'un réacteur à lit fluidisé tient

à sa vitesse de réaction supérieure et au meilleur transfert de chaleur et donc aux plus hautes températures de réaction que l'on peut atteindre. Après la chloration, un procédé de séparation et de purification ultérieur est normalement nécessaire pour obtenir un tétrachlorure de titane présentant une pureté d'environ 99,9 %.

8.1.6.1 Production d'éponge de titane

Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus, la production d'éponge de titane métal peut être réalisée soit par le procédé Kroll, soit par le procédé Hunter. Dans le procédé Kroll, du tétrachlorure de titane pur (TCT, un liquide incolore se vaporisant) est réduit par réaction avec du magnésium fondu sous une atmosphère de gaz inerte. La réaction a lieu dans une cuve de réaction qui est construite en acier inoxydable ou en acier au carbone et dont l'intérieur est parfois revêtu de titane. Un réacteur type pour la production d'éponge de titane est représenté sur la figure suivante.

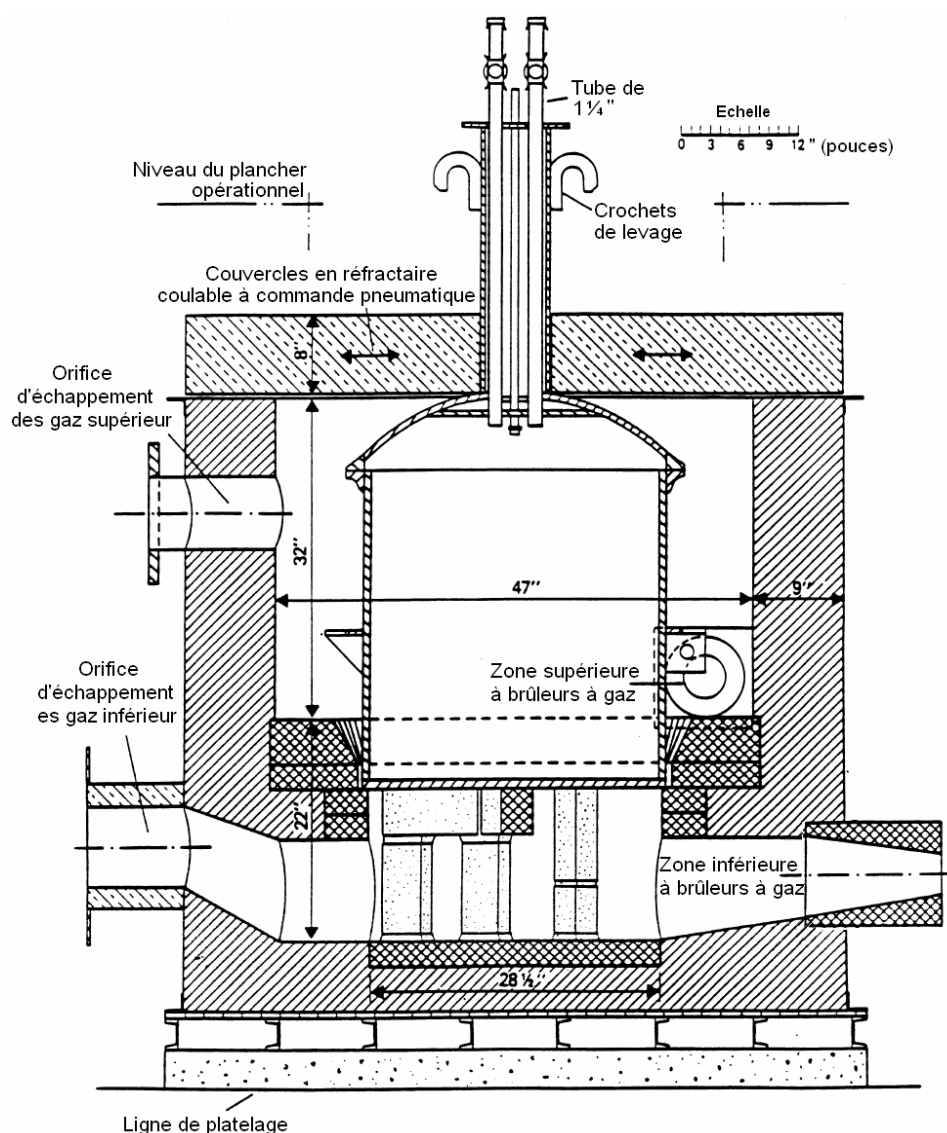


Figure 8.7 : Cuve de réaction pour la production de titane utilisant le procédé Kroll

[tm 008, HMIP 1993]

Tout d'abord, on charge le réacteur de gaz argon et de magnésium exempt d'oxyde. Une fois le magnésium fondu au moyen d'un chauffage externe, on procède avec précaution au chargement de TCT dans le réacteur. En raison de la nature exothermique de la réaction, on peut faire fonctionner et régler le procédé par la vitesse de l'ajout du TCT au réacteur. Le domaine de température s'étend de 850 à 950°C, les températures inférieures donnant des temps de réaction plus longs, mais une éponge de titane plus pure. Le procédé produit de l'éponge de titane métal intimement mélangée à du chlorure de magnésium et à d'autres impuretés telles que le magnésium et le TCT n'ayant pas réagi et certains sous-chlorures de titane. On peut éliminer ces impuretés au moyen des techniques suivantes [tm 008 HMIP 1993].

- Lixiviation acide avec de l'acide nitrique ou chlorhydrique dilué ;
- Purge de la cuve de réaction et de son contenu avec de l'argon à 1000°C, permettant donc de volatiliser et d'éliminer les impuretés ;
- Distillation sous vide à une pression de 0,2 mm de mercure et à une température d'environ 960 – 1020°C pendant de 30 à 60 heures.

Le procédé Hunter, dans lequel le TCT est réduit avec du sodium métallique, a perdu de son importance et est à présent la plupart du temps remplacé par le procédé Kroll.

On peut faire fondre l'éponge de titane pour obtenir des lingots de titane en utilisant le procédé de fusion à arc sous vide utilisant une électrode consommable.

8.1.6.2 Procédé de transformation de la matière première secondaire de titane et de l'éponge de titane

La production croissante de titane a par conséquent aussi augmenté la disponibilité de la matière première secondaire du titane. L'opération de fusion pour produire des lingots de titane en réutilisant de la matière première secondaire du titane, mais aussi de l'éponge de titane de fusion est réalisée sous vide dans des fours de conception spéciale. Des lots de déchets de titane et d'éponge de titane sont mélangés et comprimés afin de former des blocs. Les blocs sont soudés ensemble afin de produire une électrode consommable. On installe ensuite l'électrode dans la chambre du four d'une certaine manière, un creuset en cuivre refroidi, qui recueille le titane fondu, renfermant l'extrémité inférieure de l'électrode. Un arc jaillit entre l'extrémité inférieure de l'électrode et le fond du creuset et l'électrode est déplacée vers le bas au fur et à mesure de sa consommation.

Des déchets de titane non traités peuvent également être utilisés directement comme additif à l'acier, au nickel, au cuivre, à l'aluminium ou à d'autres métaux, et pour la production de ferrotitane.

8.1.7 Tantale

Ce métal joue un rôle important dans la production des composants électroniques, des équipements chimiques et dans la technologie aérospatiale, par exemple dans la fabrication des condensateurs électroniques ou des boucliers thermiques pour les fusées porteuses. On l'utilise également dans la fabrication d'équipements de procédé résistants à la corrosion, tels que les échangeurs de chaleur pour les liquides acides, les colonnes, les diaphragmes, etc.

8.1.7.1 Production de tantale métallique à partir de matière première primaire

La production de tantale métallique peut être basée tant sur les minéraux contenant du tantale que sur le laitier riche en tantale provenant de la fusion de concentrés de l'étain. La récupération du tantale à partir de laitier d'étain a augmenté au cours de ces dernières années et représente aujourd'hui environ 30 % (dans le

monde) de la production de tantale totale. La production des oxydes de tantale et de niobium à partir de laitier d'étain est présentée sur la figure suivante.

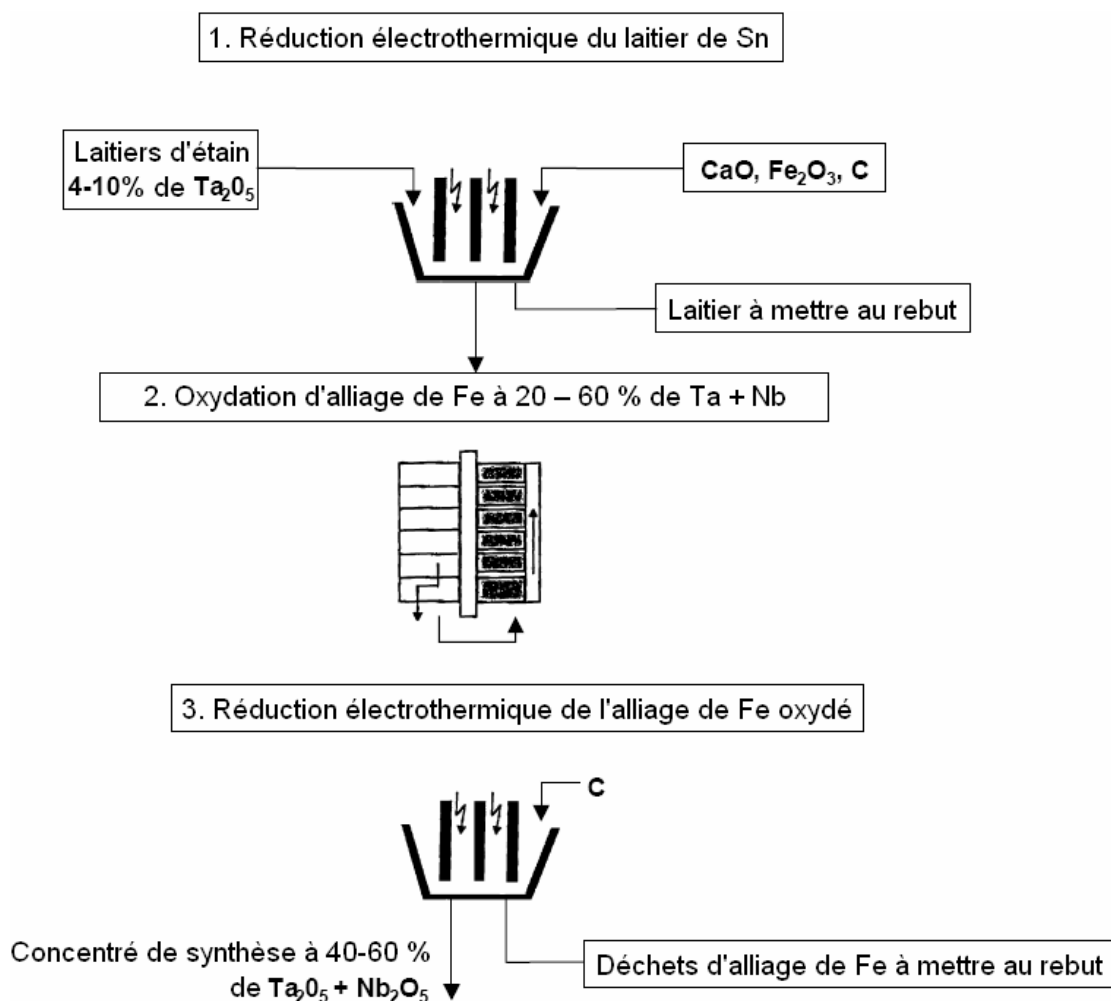


Figure 8.8 : Production d'oxydes de tantale et de niobium à partir de laitier d'étain

Le minéral contenant du tantale est tout d'abord concassé et traité par flottation et lixiviation ultérieure et concentré par flottation ou par d'autres procédés bénéfiques. Le concentré est digéré dans de l'acide fluorhydrique. Par la suite, on extrait du Ta et du Nb au moyen de solvants organiques afin d'obtenir de l'heptafluorotantalate de potassium en tant que produit intermédiaire. L'heptafluorotantalate de potassium est ensuite réduit par du sodium en poudre de tantale. Pour produire une poudre de métal pure, on peut en principe utiliser deux procédés. Le premier est réalisé par la désoxydation de la poudre de tantale avec du magnésium ou un traitement thermique sous vide sous gaz protecteur. Le deuxième procédé se déroule en faisant fondre la poudre dans un four à bombardement électronique (EBM, "electron beam furnace"). En raison du point de fusion élevé du tantale, la plupart des impuretés présentes dans la poudre sont volatilisées et captées par les effluents gazeux du four. La poudre purifiée peut ensuite être utilisée pour la production de produits semi-finis ou la fabrication de condensateurs au tantale. Le procédé de production de tantale est récapitulé sur la figure qui suit.

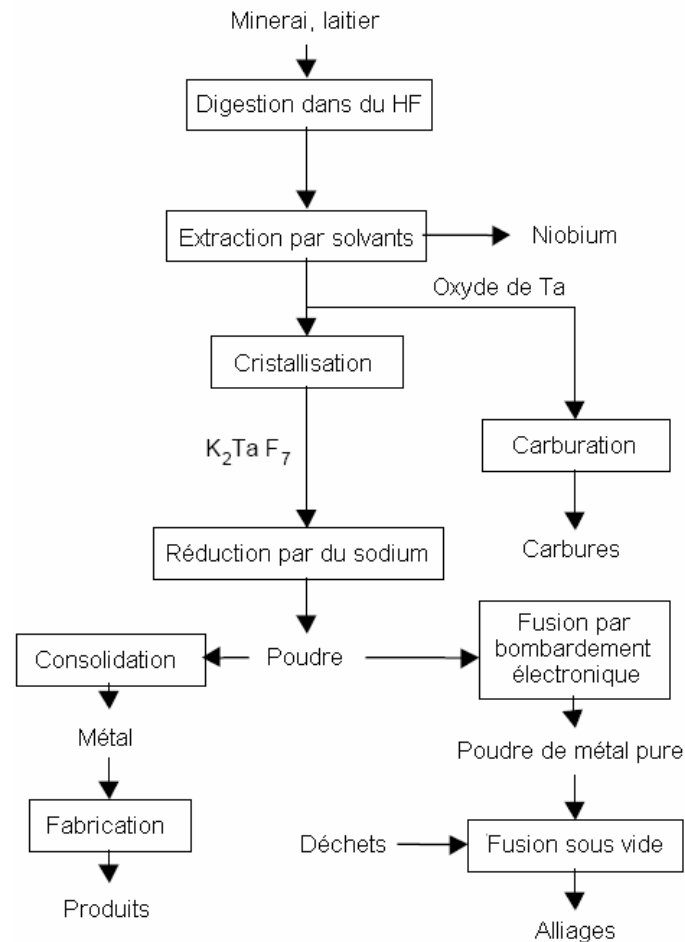


Figure 8.9 : Production de poudre de tantale pure

8.1.7.2 Procédé de transformation de la matière première secondaire de tantale

Les matières premières secondaires utilisées pour produire du tantale sont des déchets qui consistent en du tantale non oxydé et en du tantale oxydé lié à d'autres métaux oxydés. Les déchets de tantale non oxydé, par exemple des parties frittées, peuvent être refondus dans un four à bombardement électronique ou traités par déshydrogénation dans un four sous vide afin de produire à nouveau de la poudre de tantale. Le second type de déchets consiste en du tantale oxydé, par exemple des anodes de tantale oxydé revêtues de dioxyde de manganèse ou d'argent conducteur [tm 107 Ullmanns 1996]. Ces déchets peuvent être traités avec de l'acide nitrique ou avec de l'acide chlorhydrique et génèrent un résidu contenant du tantale oxydé. Autrement, on peut faire fondre les déchets qui contiennent du dioxyde de manganèse directement en transformant les oxydes, par réduction dans un plasma d'argon-hydrogène, et produire ainsi du tantale métal.

8.1.8 Niobium

Le niobium est un métal réfractaire étroitement apparenté au tantale et, par conséquent, il offre pratiquement la même résistance à la corrosion que ce dernier mais une température de fusion qui est proche de celle du molybdène. On utilise le niobium sous la forme de canalisations dans les réacteurs nucléaires en raison de sa résistance au bombardement par neutrons. On l'utilise également pour les

tuyères des fusées et les moteurs à réaction en raison de sa grande résistance à l'oxydation et de sa grande résistance mécanique pour un faible poids de niobium.

8.1.8.1 Production de niobium à partir de matière première primaire

Dans de la matière première primaire comme la colombite et la tantalite, le niobium apparaît toujours conjointement avec du tantale et avec d'autres éléments. Pour séparer les deux métaux, la production de niobium réclame le même procédé de séparation que celui utilisé par la production du tantale. Après une série de diverses opérations unitaires, le procédé de prétraitement produit du pentoxyde de niobium en tant que produit intermédiaire. On peut utiliser le pentoxyde de niobium dans l'industrie chimique ou le transformer ensuite, par réduction, en poudre de niobium métal et en carbure de niobium. Le transformation des composés du niobium et du tantale est présentée sur la figure suivante.

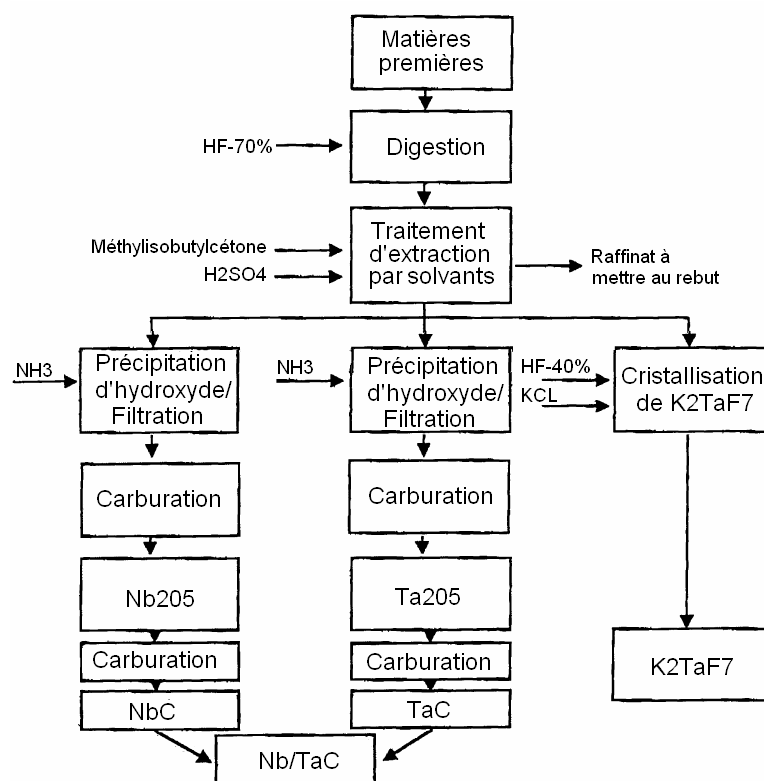


Figure 8.10 : Transformation des composés du niobium et du tantale

La production de niobium métal peut être réalisée par réduction carbothermique ou métallothermique de pentoxyde de niobium, tandis que le procédé le plus important est la réduction de pentoxyde de niobium avec de l'aluminium. Le procédé aluminothermique produit de nos jours pratiquement 90 % du métal niobium métal. Le procédé est réalisé sous vide dans un four à arc électrique et produit du niobium métal à faible teneur en oxygène et exempt de carbone.

Lors de la réduction carbothermique, le pentoxyde de niobium est mélangé avec du carbone, aggloméré en granulés et réduit dans un four sous vide. Le procédé qui a lieu à environ 1950°C produit du niobium métal à forte teneur en carbone et en oxygène qui nécessite une étape de raffinage supplémentaire.

L'étape de raffinage est nécessaire pour éliminer les impuretés qui sont amenées dans le procédé par la matière première ou introduites au cours du procédé. Le raffinage a lieu à des températures élevées en

utilisant un four à arc électrique ou un four à bombardement électronique. En raison du point de fusion élevé du niobium, la plupart des impuretés sont éliminées du bain en fusion par vaporisation. Pour obtenir un résultat de raffinage suffisant, le niobium brut nécessite un second cycle de raffinage. Le procédé de raffinage et de fusion par bombardement électronique génère du niobium métal à haute pureté que l'on peut utiliser pour les supraconducteurs à haute fréquence.

8.1.9 Rhénium

Le rhénium, métal réfractaire avec le troisième point de fusion le plus élevé, n'a que récemment été exploité pour un usage commercial. Moins d'un quart de la consommation de rhénium se fait sous la forme d'alliages dans lesquels le rhénium est un très petit constituant, bien que d'importance. La plus grande application se trouve dans les catalyseurs au platine-rhénium utilisés pour produire de l'essence sans plomb. D'autres utilisations comprennent les thermocouples, les catalyseurs de reformage et diverses applications électriques.

Le rhénium est exclusivement produit sous la forme d'un sous-produit du procédé de grillage de la molybdénite, dans lequel le rhénium est volatilisé et sort avec les effluents gazeux du four de grillage. On peut ensuite récupérer le rhénium dans les effluents gazeux par des laveurs à haute énergie.

8.1.9.1 Récupération du rhénium par grillage de la molybdénite

Le procédé de grillage du minerai de molybdénite produit de grandes quantités de poussières et de dioxyde de soufre et également du rhénium vaporisé qui se présente sous la forme d'heptaoxyde de rhénium (Re_2O_7). Le rhénium s'échappe avec les effluents gazeux du four de grillage en raison de sa pression de vapeur élevée. L'heptaoxyde de rhénium et l'oxyde de sélénium présents dans les effluents gazeux peuvent être séparés des effluents gazeux émis en utilisant une opération de lavage par voie humide. La récupération du rhénium dans les gaz émis lors du grillage de la molybdénite est représentée de façon schématique sur la figure suivante [tm 107 Ullmanns 1996].

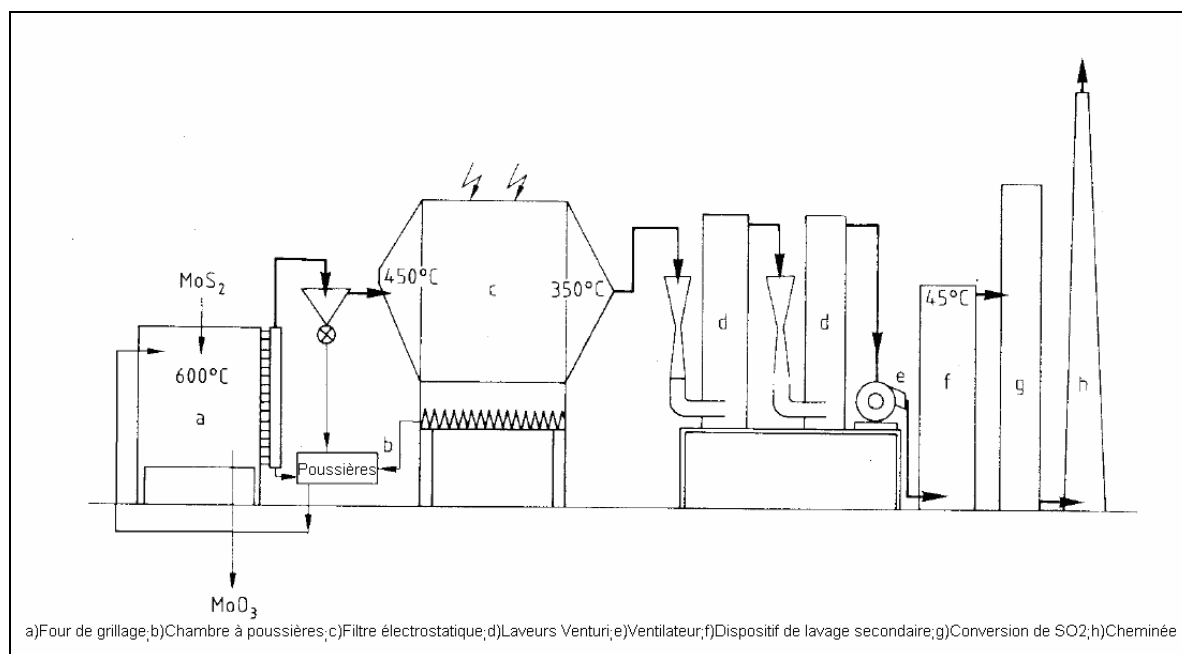


Figure 8.11 : Récupération du rhénium dans les gaz de fumées lors du grillage de la molybdénite

En raison de la capacité de l'heptoxyde de rhénium à se dissoudre dans l'eau, on le transfère facilement dans la solution de lavage. L'eau de lavage est remise en circulation dans le laveur afin d'obtenir une concentration de rhénium plus élevée. La solution de lavage concentrée qui contient environ 0,2 à 1,5 g/l de rhénium peut ensuite être traitée par précipitation chimique ou, de préférence, au moyen d'échangeurs d'ions afin d'obtenir du rhénium métal.

8.1.9.2 Production de rhénium métal

Après la séparation du rhénium contenu dans les effluents gazeux émis par le four de grillage, on peut le récupérer dans la solution de lavage par précipitation sous la forme de son sulfure difficilement soluble ou au moyen d'échangeurs d'ions. Un traitement supplémentaire avec des acides minéraux forts conduit au produit intermédiaire dénommé per-rhénate d'ammonium. On peut ensuite réduire le perrhénate d'ammonium avec de l'hydrogène afin d'obtenir de la poudre de rhénium métal. Le procédé de réduction a lieu sous la forme d'un procédé en deux étapes. Lors de la première étape qui se déroule à environ 300 – 350°C, du dioxyde de rhénium sera produit. La seconde étape transforme le dioxyde de rhénium par réduction à 800°C en rhénium métal, lequel peut être obtenu du procédé à l'état de poudre de métal pure. La poudre de métal peut ensuite être comprimée et frittée afin de donner des granulés ou de grandes pièces de fabrication.

8.1.10 Zirconium et Hafnium

Les métaux frères zirconium et hafnium ont tous les deux un rôle important dans l'industrie du nucléaire en raison de leurs excellentes propriétés de métallurgie et de résistance à la corrosion dans l'environnement extrême du noyau nucléaire, tout en ayant exactement l'effet opposé sur les neutrons thermiques. Outre ceci, le zirconium est également utilisé dans l'industrie chimique de même que les briques de zircon sont nécessaires comme garnissages intérieurs des fours.

La production de zirconium et d'hafnium commence par le mélange de concentrés de zircon et de carbone. Le mélange peut ensuite être chloré dans un réacteur à lit fluidisé. On peut séparer le chlorure de zirconium des effluents gazeux du réacteur par une condensation régulée par la température. Une dissolution dans un eutectique de sel fondu à bas point de fusion est suivie de la vaporisation d'un chlorure de zirconium et d'hafnium. La séparation du zirconium et de l'hafnium est réalisée par une extraction par solvants au cours de laquelle on peut extraire du zirconium ou de l'hafnium de façon sélective suivant le solvant d'extraction utilisé. La production de métal utilise le procédé Kroll, dans lequel le tétrachlorure de zirconium/hafnium est sublimé et réduit avec du magnésium et du chlorure de magnésium. Le produit de cette étape du procédé peut ensuite être transformé, par raffinage sous vide à l'arc, pour donner le métal final.

8.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

La fabrication des métaux réfractaires a normalement lieu à des températures élevées. On peut classer l'impact environnemental sur l'air, l'eau et le sol de la façon suivante.

- Consommation de matière première et d'énergie
 - Consommation de matière première et d'énergie.
- Emissions dans l'air
 - Emissions de poussières et de fumées provenant de la fusion et de la production de métal dur et de carbure ;
 - D'autres émissions dans l'air sont l'ammoniac (NH_3), les vapeurs d'acide (HCl), le fluorure d'hydrogène (HF), les COV et les métaux lourds ;
 - Emissions de nuisances sonores et de vibrations.
- Résidus, déchets et sous-produits solides
 - poussières, fumées et boues,
 - laitier.
- Emissions d'eaux usées
 - trop-plein des systèmes de lavage par voie humide,
 - eaux usées provenant de la granulation du laitier et de métal,
 - extraction des cycles d'eau de refroidissement.

8.2.1 Consommation de matière première et d'énergie

Les données disponibles de consommation de matière première et d'énergie pour la production des métaux réfractaires sont présentées dans les tableaux suivants en termes de facteurs d'entrée spécifiques rapportés à une tonne de produit généré.

	Cr	W
Minerai et concentrés kg/t	Oxyde de chrome	n.d.
Consommation d'énergie kWh/t	139	1000 – 1500 (Production de PTA) 3500 – 12000 (Production de carbure) 1500 – 2500 (Procédé au zinc)
Gaz m ³ /t	6	n.d.
Eau m ³ /t	2 (N 1)	n.d.
Poudre d'aluminium kg/t	n.d.	n.p.
Poudre de calcium kg/t	n.p.	n.p.
Autres kg/t	n.d.	n.d.
Notes (N 1) Le chiffre présenté sur la consommation d'eau ne peut donner qu'une indication. n.d. = données non disponibles n.p. = non pertinent dans ce procédé de production		

Tableau 8.1 : Données de consommation pour la production de métaux réfractaires exprimés en facteurs d'entrée spécifiques

Le tableau suivant présente des informations sur des données de procédé concernant la fusion de métaux réfractaires dans un four à bombardement électronique. Dans les fours à bombardement électronique, des canons à électrons produisent des électrons à haute énergie qui, par collision, transmettent leur énergie à la charge contenue dans le four afin d'avoir une incidence sur sa fusion.

Les fours à bombardement électronique sont utilisés pour faire fondre et/ou raffiner des métaux réfractaires tels que le vanadium, le niobium et le tantale, des métaux tels que le molybdène et le tungstène de même que des métaux réactifs tels que le zirconium et l'hafnium [tm 107, Ullmanns, 1996].

Métal	Volume du creuset [t]	Puissance du four [MW]	Capacité de production [t/h]	Consommation d'énergie [kWh/t]
Niobium	0,5 - 2	< 1,2	0,02 – 0,4	6000 - 15000
Tantale	0,5 - 2	< 1,2	0,02 – 0,4	6000 - 15000
Molybdène			0,02 – 0,1	< 5000
Tungstène			0,02 – 0,1	< 5000
Titane			0,2 – 1	1000

Tableau 8.2: Données de procédé concernant la fusion de métaux réfractaires dans un four à bombardement électronique [tm 107, Ullmanns 1996]

8.2.2 Émissions

8.2.2.1 Émissions dans l'air

Suivant la matière première qui est nécessaire et les opérations unitaires utilisées, par exemple le concassage, le séchage, la fusion, la séparation du métal et du laitier, la calcination, la réduction par hydrogène, la carburation et la manipulation des produits, l'une des sources d'entrants dans les compartiments environnementaux les plus importantes sont les émissions de poussières et de fumées. Les émissions de poussières sous forme d'émissions canalisées en cheminée, soit fugitives sont importantes parce que des composés métalliques nocifs, tels que le manganèse et le cobalt, peuvent faire partie des poussières.

Le déchargement et le stockage de la matière première peuvent générer des poussières lorsque l'on fait passer la matière d'un confinement en conditionnements tels que les fûts, les sacs en plastiques ou conteneurs souples dans des bennes.

Les poussières et les fumées qui sont générées lors de la fonte ou de la fusion par exemple d'un métal tel que le chrome ou le titane ou qui proviennent de la production de poudre de métal dur, sont recueillies par des hottes et transmises à un système de dépollution et dépoussiérées (par exemple, par un séparateur à tissu filtrant ou un laveur humide). Les émissions canalisées sont normalement surveillées en continu ou périodiquement et sont déclarées par le personnel du site ou par des consultants extérieurs aux autorités compétentes. Les pertes fugitives peuvent également être mesurées comme cela est montré dans le chapitre 2 qui donne une vue d'ensemble des techniques génériques utilisées lors de la production des métaux non ferreux.

Des métaux lourds sont amenés dans le procédé sous la forme d'éléments à l'état de traces présents dans la matière première primaire ou secondaire. Les métaux à points d'ébullition en dessous de la température du

procédé s'échapperont comme gaz sous forme de vapeur de métal qui en partie se condense et s'oxyde pour faire partie des poussières et des fumées provenant de la chambre de cuisson. Les vapeurs métalliques et les effluents gazeux produits par la fusion ou le raffinage de métaux réfractaires dans un four à bombardement électronique sont recueillis par un système de pompage sous vide et sont ensuite condensés sous l'effet d'un refroidissement intensif.

Un autre impact environnemental de la production de métaux réfractaires tels que le tantale, le zirconium et l'hafnium sont les taux de radioactivité de certaines matières premières. De plus, il est nécessaire de tenir compte de la toxicité de certains métaux réfractaires, par exemple du chrome, du manganèse et du vanadium. Il en va de même lorsque du cobalt fait partie de la poudre de métal dur, cas dans lequel on a alors observé l'apparition de "fibrose pulmonaire interstitielle diffuse par métaux durs" [tm 008, HMIP, 1993].

8.2.2.2 Émission dans l'eau

Pour la production des métaux réfractaires, les émissions dans l'eau dépendent fortement du procédé et du système de dépollution utilisés, ainsi que du type de traitement des eaux usées utilisé. Il existe divers systèmes différents de collecte des eaux et de traitement des eaux usées. Dans certaines stations, on utilise une station d'épuration des eaux usées centralisée dans laquelle l'eau provenant de divers procédés de production et les eaux de ruissellement de surface sont traitées ensemble. Dans d'autres installations, on utilise un système de traitement distinct pour les eaux de pluie et des procédés de traitement spéciaux pour les divers écoulements d'eaux résiduaires des procédés. Les principaux polluants de l'eau sont les composés métalliques et les solides en suspension. Les eaux usées sont traitées pour retirer les solides et les métaux dissous et elles sont recyclées ou réutilisées autant que possible dans le procédé. Les éventuels écoulements d'eaux usées sont :

- les eaux de ruissellement de surface et les eaux de drainage,
- les eaux usées provenant des laveurs humides,
- les eaux usées provenant de la granulation du laitier et de métal,
- l'eau de refroidissement.

Les eaux polluées sont normalement acheminées vers un épaisseur ou un bassin de décantation afin de décanter les solides en suspension. On utilise souvent des étapes de précipitation pour éliminer les composés métalliques de l'eau. Les particules consistent la plupart du temps en de très fines particules, il peut donc être nécessaire d'ajouter un flocculant pour faciliter le dépôt dans les dispositif d'épaississement. Après le traitement par un épaisseur ou dans un bassin de décantation, les solides en suspension sont généralement en dessous de 20 mg/l, ce qui permet leur réutilisation dans les laveurs, sous forme d'eau de refroidissement ou sous forme d'eau de procédé pour d'autres besoins.

8.2.2.3 Sous-produits, résidus de procédé et déchets

La production des métaux réfractaires est liée à la formation d'un certain nombre de sous-produits, de résidus et de déchets, qui sont également répertoriés dans le catalogue européen des déchets (Décision 94/3/CEE du Conseil). Les résidus spécifiques de procédés les plus importants sont les poussières des filtres, les boues des laveurs humides, le laitier du procédé de fusion, les garnissages intérieurs de fours usagés et des matériaux d'emballage tels que les fûts ou les big-bags. Ces résidus sont en partie vendus comme sous-produits, recyclés dans le procédé ou, dans le cas des déchets qui ne présentent aucun intérêt économique, transportés vers un stockage ou une décharge.

8.2.2.4 Résumé des émissions générées par la production des métaux réfractaires

Tenant compte des divers procédés utilisés dans la production des métaux réfractaires, le tableau suivant donnera un panorama sur les entrants dans les compartiments environnementaux en termes d'émission dans l'air, l'eau et le sol. Ce tableau fera également une distinction entre l'utilisation de matière première primaire et de matière première secondaire.

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Chrome			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant du stockage, de la manipulation et de la préparation des matières premières. Epurées par un filtre à manches	5 – 10	<ul style="list-style-type: none"> Effluent provenant de la cuve de refroidissement à l'eau (cuve à eau) 	<ul style="list-style-type: none"> Poussières recueillies dans le système de dépollution Le laitier de chrome-alumine est vendu comme matière première destinée à être utilisée principalement dans l'industrie des réfractaires et de l'acier ou, ainsi qu'il a été dit précédemment, re-utilisé pour les garnissages de les pots de cuisson. Le laitier récupéré dans les cuves de refroidissement à l'eau, les débris de la cabine de démoulage et ceux des pots de réaction utilisés pour le démoulage sont mis en décharge dans une décharge autorisée. 	
	Poussières	Provenant de la chambre de cuisson. Epurées par un filtre à manches	< 5			
	Poussières	Emissions fugitives provenant de la fusion et de la séparation du métal et du laitier	n.d.			
	Cr	La quantité de chrome et des composés de celui-ci faisant partie des émissions de poussières totales est mentionnée être inférieure à	< 2.			
Matière première secondaire						<ul style="list-style-type: none"> Les déchets de chrome métal sont généralement utilisés directement dans la production d'aciers ou pour la production de ferrochrome
Manganèse			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant du stockage, de la manipulation et de la préparation des matières premières. Epurées par un filtre à manche	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la production d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Déchets de la purification d'électrolytes Electrolyte usagé Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres résidus 	
	Mn	Fumée de manganèse Tétraoxyde de manganèse et composés organiques du manganèse	n.d.			
Matière première secondaire						<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la production de manganèse secondaire

Tableau 8.3: Émissions générées lors de la production du chrome et du manganèse

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Tungstène			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Stockage et manipulation des matières premières (nacelles de chargement)	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Les systèmes d'eau de refroidissement sont conçus sous forme de circuits fermés et ne sont pas en contact avec la matière traitée On vérifie la teneur en W et en NH₄ des eaux usées résultant de l'épuration et, si besoin est, on les traite afin de réduire ces teneurs. 	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières qui sont recueillies dans le système de dépollution sont recyclées dans le procédé de production. Résidus de la cristallisation et du séchage de PTA 	<ul style="list-style-type: none"> Les émissions de poussières sont normalement bien en dessous des VLE mentionnées (20 mg/Nm³) parce que la poudre de W est un matériau de valeur Les seules concentrations d'émission de poussières mesurées disponibles qui ont été mentionnées sont exclusivement dans la plage de 1 – 3 mg/Nm³. Ces données sont dues à la production de poudre de tungstène et de carbure de tungstène L'ammoniac est une substance dont l'odeur est très intense, ce qui peut facilement aboutir à des problèmes d'odeurs.
	Poussières	Calcination	1 – 6			
	Poussières	Réduction par hydrogène	< 5			
	Poussières	Réduction en poudre	< 10			
	Poussières	Manipulation de produit	< 10			
	Poussières	Émissions fugitives résultant du chargement et du déchargement du four. Entraînement de fines particules.	n.d.			
	NH ₃	Fumées de décomposition d'ammoniac fugitives provenant de la calcination	< 60.			
	H ₂	Possible risque d'incendie à partir des fumées d'hydrogène				
Matière première secondaire	Poussières	Idem que pour la production primaire	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Les systèmes d'eau de refroidissement sont conçus sous la forme de circuits fermés et ne sont pas en contact avec la matière traitée Les eaux usées qui résultent de l'épuration sont traitées dans une installation d'épuration des eaux usées spéciale 	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières qui sont recueillies dans le système de dépollution sont recyclées dans le procédé de production. 	<ul style="list-style-type: none"> Le cobalt est normalement ajouté à la poudre de métal dur. Ceci peut occasionner la "fibrose pulmonaire interstitielle diffuse par métaux durs", par conséquent la concentration des émissions de Co est inférieure à 1 mg/Nm³.
	Zn	Fumées de zinc issues du procédé de distillation	n.d.			
	Co	Fumées de cobalt issues du procédé de distillation (Co fait partie des déchets de métal dur)	< 1			

Tableau 8.4: Émissions générées lors de la production du tungstène et de la poudre de tungstène

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Vanadium			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant de la préparation de matière première telle que le broyage	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Poussières recueillies dans le système de dépollution Rejets de lixiviat Par d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres résidus. 	<ul style="list-style-type: none"> La poudre de calcium qui est utilisée comme réducteur devrait être stockée très prudemment en raison du grand risque d'incendie.
	Poussières	Provenant du mélange avec des sels de métaux alcalins pour le procédé de grillage	< 3			
	Ca	Des fines de calcium peuvent être émises lorsqu'on utilise de la poudre de calcium comme réducteur	n.d.			
	Al	Des fines d'aluminium peuvent être émises lorsqu'on utilise de la poudre d'aluminium comme réducteur	n.d.			
Matière première secondaire	Diverses émissions de produits chimiques par les procédés sont possibles, mais dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Données non disponibles.			Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	Boues de décomposition du vanadium Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus	
Molybdène			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant du stockage, de la manipulation et de la préparation des matières premières. Epurées par un filtre à manches	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus 	<ul style="list-style-type: none"> D'après le classement international, le trioxyde de molybdène (MoO₃) est classé dans les substances dangereuses (XN - nocif)
	Poussières	Émissions fugitives provenant du chargement et du déchargement, entraînement de fines particules	n.d.			
	Mo	Fumées	n.d.			
	H ₂	Possible risque d'incendie à partir des fumées d'hydrogène				
Matière première secondaire	Diverses émissions de produits chimiques par les procédés sont possibles, mais dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Données non disponibles.			<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus 	

Tableau 8.5: Émissions générées lors de la production du vanadium et du molybdène

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Titane			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières		< 10	<ul style="list-style-type: none"> Des effluents liquides sont générés en utilisant les systèmes de lavage par voie humide. Ces effluents peuvent contenir de l'acide chlorhydrique, du TCT et de l'hydroxyde de sodium. Des effluents liquides résultent de l'utilisation d'eau de refroidissement lors d'un refroidissement à passage unique ou surviennent sous la forme d'une purge provenant de systèmes d'eau de refroidissement en circuit fermé desservant des cuves de réacteur et des creusets dans les fours de fusion Eau de lavage avec détergent des déchets Lixiviat acide et eau de rinçage Eau de lavage de l'éponge Effluent de purification du chlorure de titane 	<ul style="list-style-type: none"> Poussières recueillies dans le système de dépollution. Les poussières contiennent du titane, du dioxyde de titane et de l'oxyde de sodium. Certains creusets de fours de fusion sont refroidis avec des alliages liquides de sodium-potassium (NaK) et de petites quantités de matière oxydée de cette source sont générées sous la forme de boue. On fait réagir la boue avec de l'eau et le liquide qui en résulte est envoyé à la station d'épuration des effluents. 	<ul style="list-style-type: none"> Le titane particulière consiste en des particules relativement grossières qui se déposent rapidement et représentent un risque d'incendie. Un lavage fréquent permet de s'assurer qu'une accumulation n'apparaît pas et les poussières peuvent normalement être vendues comme sous-produit. TCT (Tétrachlorure de titane)
	Poussières	Des poussières contenant des sels, des fines de titane et éventuellement de petites quantités de sodium sont produites pendant le concassage du produit fondu retiré de la cuve de réaction.				
	Poussières	Émissions fugitives	n.d.			
	Fumées d'acide	Fumées d'acides chlorhydrique, fluorhydrique et nitrique	n.d.			
	TiOCl	La vapeur de TCT s'hydrolyse au contact de l'air humide, produisant un brouillard qui contient du dioxyde de titane, de l'oxychlorure de titane (TiOCl) et de l'acide chlorhydrique				
	TCT	L'argon utilisé pour fournir une atmosphère inerte dans la cuve du réacteur ramasse des traces de TCT et de sodium				
	TiO ₂ NaO	Les fumées dégagées lors du nettoyage des couvercles du réacteur contiennent du dioxyde de titane et de l'oxyde de sodium				
	Cl		< 5.			
Matière première secondaire	Émissions qui sont comparables aux émissions dans l'air mentionnées ci-dessus			Effluents similaires à ceux de la production primaire	Mêmes résidus que pour la production primaire	

Tableau 8.6: Émissions générées lors de la production du titane métal

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Tantale			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Stockage et manipulation de matières premières (nacelles de chargement)	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Les systèmes d'eau de refroidissement pour le four à bombardement électronique sont conçus sous la forme de circuits fermés et ne sont pas en contact avec la matière traitée Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres sources d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières qui sont recueillies dans le système de dépollution sont recyclées dans le procédé de production. Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres résidus 	<ul style="list-style-type: none"> Ces données sont dues à la production de poudre de tantale métal et de carbure de tantale. Le tantale n'est pas toxique et est bioinerte. On ne connaît pas de réactions allergiques [tm 108, Ullmanns, 1996] L'ammoniac est une substance dont l'odeur est très intense, ce qui peut facilement aboutir à des problèmes d'odeurs. Certaines matières premières du tantale peuvent présenter des taux de radioactivité élevés. Le HF (Fluorure d'hydrogène) est très toxique et peut être facilement absorbé par contact cutané.
	Poussières	Calcination	< 5			
	Poussières	Réduction par hydrogène	< 5			
	Poussières	Carburation	< 5			
	Poussières	Réduction en poudre	< 10			
	Poussières	Manipulation de produit (poudre fine)	< 10			
	Poussières	Émissions fugitives provenant du chargement et du déchargement du four. Entraînement de fines particules.	n.d.			
	NH ₃	Vapeurs de décomposition d'ammoniac en émission canalisée et/ou fugitive, provenant de la calcination	< 60.			
Matière première secondaire	HF	Fluorure d'hydrogène	< 1	<ul style="list-style-type: none"> Les systèmes d'eau de refroidissement pour le four à bombardement électronique sont conçus sous la forme de circuits fermés et ne sont pas en contact avec la matière traitée Lixiviation et rinçage d'alliages du tantale Lixiviation et rinçage des boues de tantale Lavage à l'acide de la poudre de tantale et rinçage Lixiviation et rinçage de condensateur 	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières qui sont recueillies dans le système de dépollution sont recyclées dans le procédé de production Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres résidus 	<ul style="list-style-type: none"> Le HF (Fluorure d'hydrogène) est très toxique et peut être facilement absorbé par contact cutané. On doit en tenir compte dans le stockage et la manipulation du HF. Du cobalt est normalement ajouté à la poudre de métal dur. Ceci peut occasionner la "fibrose pulmonaire interstitielle diffuse par métaux durs", par conséquent la concentration des émissions de Co est inférieure à 1 mg/Nm³.
	H ₂	Possible risque d'incendie à partir des fumées d'hydrogène				
	NH ₃	Vapeurs de décomposition d'ammoniac en émission canalisée et/ou fugitive, provenant de la calcination	< 60.			
	HF	Fluorure d'hydrogène	< 1			
	Des métaux à l'état de traces tels que Co, MnO, Ni et Ag peuvent être présents dans les déchets de tantale et risquent d'être émis.		Ni < 1 Co < 1			

Tableau 8.7: Émissions générées lors de la production du tantale métal

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Niobium			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant de toutes sources épurées par un filtre à manche	< 10	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'informations disponibles au sujet de génération d'eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> Poussières recueillies dans le système de dépollution Laitier provenant de la réduction dans le four sous vide On sait que le pyrochlore, qui est une importante source de matière première, peut contenir des taux de radioactivité élevés et le procédé de fusion thermique est donc potentiellement polluant sur le plan environnemental pour ce qui est de la mise au décharge du laitier. Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'autres résidus 	<ul style="list-style-type: none"> Le niobium et ses composés présentent une très faible toxicité Le HF (fluorure d'hydrogène) est très toxique et peut être facilement absorbé par contact cutané. On doit en tenir compte dans le stockage et la manipulation du HF.
	Poussières	Provenant de la manipulation des poudres fines	< 5			
	Poussières	Provenant de la production de carbures de niobium	< 5			
	Poussières	Émissions fugitives	n.d.			
	COV	Provenant de l'extraction par solvant	n.d.			
	HF	Émissions de fluorure d'hydrogène	< 1			
	HCl		< 5			
	Al	Des fines d'aluminium peuvent être émises en manipulant de la poudre d'aluminium qui est utilisée comme réducteur				
	Les autres émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Des données supplémentaires ne sont pas disponibles.					
Matière première secondaire	Poussières	Provenant de toutes sources épurées par un filtre à manche	< 10	Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus	<ul style="list-style-type: none"> Le HF (fluorure d'hydrogène) est très toxique et peut être facilement absorbé par contact cutané. On doit en tenir compte dans le stockage et la manipulation du HF.
	HF	Émissions de fluorure d'hydrogène provenant de la digestion	< 1			
	Les autres émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Les données ne sont pas disponibles.					

Tableau 8.8: Émissions générées lors de la production du niobium métal

Métal réfractaire	Émission dans l'air			Émission dans l'eau	Génération, recyclage et réutilisation des résidus de procédés	Remarques
Rhénium			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant de toutes sources épurées par un filtre à manche	< 10	<ul style="list-style-type: none">• Production d'eaux usées• Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	<ul style="list-style-type: none">• Poussières recueillies dans le système de dépollution• Boue en tant que résidu de la séparation du rhénium de la solution de lavage• Résidus de raffinage• Solides du traitement des boues• Raffinat de rhénium	<ul style="list-style-type: none">• Le rhénium et ses composés présentent des niveaux de toxicité très faibles.
	Poussières	Provenant de la manipulation de poudres fines	< 5			
	Poussières	Émissions fugitives	n.d.			
	Les autres émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Des données supplémentaires ne sont pas disponibles.					
Matière première secondaire	Les émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Les données ne sont pas disponibles.			Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus	
Zirconium et hafnium			mg/Nm ³			
Matière première primaire	Poussières	Provenant de toutes sources épurées par un filtre à manche	< 10	<ul style="list-style-type: none">• Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	<ul style="list-style-type: none">• Zr et Hf sont également associés à des métaux radioactifs (uranium, polonium et thorium) qui peuvent être présents dans les résidus• Lixiviat acide provenant de la production d'alliages et de métal zirconium.• Eau de rinçage de lixiviation provenant de la production d'alliages et de métal zirconium.• Acide résiduaire	<ul style="list-style-type: none">• Le procédé de fabrication du zirconium présente un risque environnemental important qui est lié à sa radioactivité résiduaire provenant de métaux radioactifs (uranium, polonium et thorium) présents dans le sable pour grosses pièces qui est utilisé comme matière première. Les niveaux de radiation ne sont pas publiés.
	Poussières	Emissions fugitives	n.d.			
	F	Emissions de fluorure	n.d.			
	Radioactivité provenant du Zircon		n.d.			
	Le procédé de chloration pour séparer le concentré de zircon et la volatilisation du tétrachlorure de zirconium réclament des procédures de confinement strictes. Les autres émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Des données supplémentaires ne sont pas disponibles.					
Matière première secondaire	Les émissions dépendent de la matière première et du procédé utilisés. Les données ne sont pas disponibles.			<ul style="list-style-type: none">• Pas d'informations disponibles au sujet de la génération d'eaux usées	<ul style="list-style-type: none">• Pas d'informations disponibles au sujet de la génération de résidus	

Tableau 8.9: Émissions générées lors de la production du rhénium, du zirconium et de l'hafnium

8.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des techniques réduisant la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les Etats membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et de les procédés associés.

Etant donné que seulement un très petit nombre de sociétés en Europe produisent des métaux réfractaires et que la plupart des procédés sont commercialement confidentiels, à l'exception du chrome métal, seules des descriptions dans les grandes lignes, très focalisées sur les questions environnementales, peuvent être présentées.

EXEMPLE 8.01 PROCÉDE DE PRODUCTION ALUMINOTHERMIQUE DE CHROME METAL

Description : La description suivante donne des détails sur une nouvelle usine installée au Royaume-Uni., pour la production aluminothermique de chrome M2TAL. L'usine a été construite dans le but de remplacer une usine de production de chrome existante qui fonctionnait depuis plus de 40 ans. L'usine a été mise en service en 1997.

Stockage des matières premières : Les matières premières telles que l'oxyde chromique et la poudre d'aluminium ainsi que divers agents d'oxydation et de conditionnement sont stockés à une extrémité du bâtiment dans des zones séparées afin d'empêcher une contamination croisée. Les agents d'oxydation sont stockés dans une enceinte bien fermée afin d'éviter le risque d'incendie.

Opération de pesage : Les conteneurs souples d'oxyde chromique sont fixés à des postes de déchargement situés au-dessus de trémies de pesage installées sur des cellules de charge au niveau du plancher. Des distributeurs à vis transfèrent les matières premières dans les trémies de pesage. Les postes de déchargement sont raccordés à des cartouches filtrantes situées en dehors du bâtiment. Les postes de déchargement de la poudre d'aluminium ne sont pas raccordés à des unités de cartouches filtrantes. Ils sont équipés de manches à air antistatiques en raison des risques d'explosion liés à ce matériau.

Les ajouts mineurs se font depuis le plancher d'une mezzanine par l'intermédiaire de postes d'extrémités de sacs/fûts. Chaque poste individuel comporte son propre dispositif d'extraction des poussières intégré. Une ventouse de levage permet à l'opérateur de vider les récipients à une hauteur de travail confortable. Tout matériau retenu par le dispositif d'extraction des poussières est décolmaté du média filtrant en le secouant périodiquement et recueilli dans une trémie de stockage incorporée située en dessous.

Le bac de pesage pour chaque lot repose sur un chariot à traction électrique qui se déplace sur une voie située dans une fosse en dessous de chaque point de déchargement. Les diverses matières premières sont distribuées automatiquement dans le bac de pesage. Ce procédé et le positionnement du bac sur la voie sont commandés par ordinateur.

Opération de mélange : Le bac de pesage est transféré à une salle fermée séparée dans laquelle le contenu est mélangé dans un malaxeur rotatif. La ventilation de cette salle est assurée par un ventilateur axial qui procède à l'évacuation dans l'atmosphère. Des panneaux filtrants en fibres de verre jetables protègent l'entrée du ventilateur.

Préparation de la cuve de cuisson : La base de la cuve de cuisson est préparée avec un matériau réfractaire granulaire sur un socle placé à une hauteur de travail confortable. Le pot est fixé à la base et transféré à une table tournante vibrante qui se trouve dans une fosse adjacente. Le matériau réfractaire est introduit par vis d'une trémie de stockage autour d'un gabarit central placé dans la cuve de cuisson, que l'on fait tourner lentement. Le garnissage intérieur est comprimé par la table tournante vibrante.

La trémie de stockage de matériau réfractaire est équipée d'un élément filtrant et extracteur de poussières monobloc.

Le garnissage intérieur serré est aspergé d'une solution de liant et séché dans l'un des plusieurs éléments de chauffage au gaz. Les émissions sont conduites à l'extérieur de l'atelier au niveau du toit par convection naturelle.

Opération de cuisson : La cuve de cuisson se trouve à l'intérieur de l'une des chambres de cuisson situées en dessous du niveau du sol. Les hottes mobiles d'extraction des fumées sont déplacées vers l'avant afin de couvrir la cuve de cuisson et d'établir le raccordement avec la principale canalisation de l'extraction.

Les bacs de pesage sont situés sur une plate-forme d'alimentation vibrante automatique. Le débit d'alimentation en matériau dans les pots de cuisson est commandé par ordinateur. Une fois le mélange mis à feu et la réaction en cours, la fumée générée est conduite à la principale installation de filtres à manches. Cette installation de filtration se trouve en dehors du bâtiment principal dans une extension située à côté des chambres de cuisson.

Après diminution de la fumée de la réaction, un volume d'extraction réduit est fourni à chaque chambre contenant un pot en refroidissement. Des registres de tirage motorisés isolent la canalisation par rapport à la chambre de cuisson lorsqu'elle est vide.

Refroidissement de la cuve de cuisson : Une fois le métal solidifié, la cuve de cuisson est enlevée et transférée par engin de levage à un long convoyeur de refroidissement à déplacement lent. Ce dernier est partiellement capoté par une hotte et ventilé par un certain nombre de ventilateurs d'extraction qui procèdent à l'évacuation dans l'atmosphère, à l'extérieur du bâtiment. Les entrées des ventilateurs sont protégées par des panneaux filtrants en fibres de verre jetables.

Opération de démoulage des loupes : la cuve de cuisson refroidie est transférée, par l'intermédiaire d'une potence, sur un chariot afin d'être transportée dans une cabine de démoulage. A l'intérieur de cette cabine fermée, la carcasse du pot est automatiquement séparée de la base par soulèvement. On tourne ensuite le chariot et une barre de raclage enlève le garnissage intérieur de matériau réfractaire. Une installation à cartouches filtrantes assure l'extraction des poussières provenant de la cabine de démoulage.

Les débris provenant du garnissage intérieur du pot tombent dans une trémie collectrice et sont transférés à un tamis vibrant. Le matériau réfractaire tamisé est recueilli dans des godets et recyclé. Une unité de filtration assure l'extraction des poussières à partir du tamis et l'évacuation du tamis.

Opération de trempe : Le laitier et le loup de chrome sont enlevés de la cabine de démoulage sur le chariot. Le laitier est séparé du loup de métal, refroidi et envoyé à une zone d'expédition. Le loup de chrome est transféré à une cuve de trempe pour y subir un refroidissement final à l'eau. La vapeur dégagée lors de cette opération de trempe est extraite par des ventilateurs et conduite à l'atmosphère en dehors du bâtiment.

Le loup de chrome refroidi est transféré à d'autres ateliers afin d'y subir nettoyage ; cassage ; concassage et broyage, avant son emballage et son expédition finale.

Principaux bénéfices environnementaux :

L'installation de filtration principale : La cuisson ne peut avoir lieu que dans une chambre à la fois en raison d'un système d'enclenchements sur les hottes mobiles et le convoyeur d'alimentation de la cuisson.

Pendant le procédé de cuisson, lorsque de grandes quantités de fumées sont générées sur une période relativement courte, le volume d'extraction est à son maximum. Pendant cette période, un volume de ventilation inférieur est disponible au niveau des autres chambres restantes [une ou plusieurs d'entre elles peuvent contenir un pot qui est en train de refroidir, mais en dégageant peu de fumées].

Lorsque aucune cuisson n'a lieu, l'installation d'extraction des fumées est automatiquement arrêtée à la plus faible vitesse d'extraction afin de réduire au minimum la consommation d'énergie de l'unité de filtration.

L'installation de filtration comprend 4 compartiments, chaque compartiment comportant 132 manches filtrantes. Le cycle de décolmatage est entièrement automatisé, avec chaque chambre décolmatée en mode 'off-line' à tour de rôle au moyen d'un système de soufflage d'air par contre-pression.

Un système de surveillance et d'enregistrement est installé sur l'installation d'extraction des fumées dans le but de surveiller en continu les émissions de particules. Celui-ci se compose d'une sonde installée dans la cheminée d'échappement et d'un collecteur de données basé sur un système combinant organe de commande/microprocesseur. Les émissions provenant de la cheminée sont surveillées en continu et tout dépassement d'un seuil déterminé à l'avance déclenchera une alarme. L'installation d'extraction des fumées fonctionne avec des niveaux d'émission de particules en dessous de 5 mg/Nm^3 .

Émissions dans l'air : Les émissions totales de particules sont inférieures à 5 mg/Nm^3 , la partie représentée par le chrome et ses composés étant inférieure à $1 - 2 \text{ mg/Nm}^3$.

Émissions dans l'eau [égout] : - La seule émission liquide provient des cuves d'eau de trempe.

Émissions dans le sol : - Les poussières de fumées résiduelles qui proviennent du procédé sont amenées à un site de décharge autorisé. La quantité de poussières de fumées générée dépendra de la quantité de chrome métal que l'on est en train de produire.

Données opérationnelles : L'usine utilise les utilités suivantes :

Electricité	- 139 kWh/tonne de Cr métal
Gaz	- 6 m^3 /tonne [la valeur calorifique du gaz est $39,2 \text{ MJ/Nm}^3$]
Eau	- 2 m^3 /tonne

Effets croisés : La nature de l'opération est telle que la plupart des rejets se font dans l'air plutôt que dans l'un ou l'autre des deux autres milieux environnementaux.

Pour la plupart des applications, la norme généralement adoptée par l'industrie des métaux pour contrôler les émissions atmosphériques est le filtre à manches. Un filtre à manches [c'est-à-dire, un système sec] a été choisi pour cette application, du fait qu'il fournisse une bonne filtration avec le moins d'impact sur l'environnement.

Les systèmes d'épuration par voie humide ont été envisagés, mais n'ont pas été retenus. Un type de dépollution par voie humide, tel qu'un laveur Venturi, aurait comme conséquence de générer des boues, dont la mise en décharge serait plus difficile et plus coûteuse et qui contiendrait une proportion d'eau importante. Le panache de la principale cheminée serait également humide et ne se disperserait pas aussi bien.

Aspects économiques : Le coût total du projet était de l'ordre d'environ 4,35 M d'euros dans lesquels étaient inclus ce qui suit :

Poste de pesage	0,72 M €
-----------------	----------

Chambres de cuisson/Dispositifs d'alimentation	0,29 M €
Convoyeur refroidisseur/Cabine de démoulage	0,36 M €
Préparation du pot	0,24 M €
Principale installation d'extraction des fumées	0,65 M €
Bâtiments et travaux publics	1,88 M €

Applicabilité : La technique présentée ci-dessus peut dans l'ensemble être appliquée à une usine nouvelle, mais peut également être appliquée en partie aux usines existantes.

Documents de référence : - [tm 162, London and Scandinavian Metallurgical CO Limited 1999]

8.3.1 Matériaux, stockage et manipulation

Les matières premières utilisées pour la production des métaux réfractaires sont fondamentalement les oxydes de métaux, des agents réducteurs tels que la poudre d'aluminium ou de calcium, l'hydrogène, et des additifs. Le principal impact sur l'environnement produit par le stockage et la manipulation de ces matières sont les émissions de poussières fugitives et parfois, selon le métal produit et le procédé utilisé, la contamination des eaux de surface et du sol lessivé par l'eau de pluie. Il y a plusieurs productions qui sont basées dans une large mesure sur la récupération de métaux réfractaires provenant de déchets. Dans ce cas, les déchets doivent être surveillés afin d'éviter que des métaux radioactifs ou sinon contaminés ne soient chargés dans le procédé sans précautions. Les taux de radioactivité élevés jouent également un rôle important lorsque l'on charge dans le procédé plusieurs matières premières telles que le zircon.

Afin d'empêcher la pollution des sols, les matières premières sont de préférence stockées dans une zone de confinement fermée sur des surfaces dures à l'intérieur. Pour garder les matières propres, la zone de stockage peut également être divisée en divers bassins de stockage. Les matières sèches à fine granulométrie devraient être manipulées dans des silos, des bacs et des trémies fermés afin d'empêcher les émissions fugitives dans l'environnement de même que dans l'espace de travail.

Pour la manipulation de fines matières pulvérulentes telles que les poudres de métal, on utilise des convoyeurs et des systèmes de transfert fermés dans lesquels on utilise un équipement d'extraction et de filtration pour les points de livraison où il y a émission. On nettoie l'air chargé de poussières qui provient des silos, des systèmes de chargement et des convoyeurs fermés au moyen de filtres à manches, lesquels peuvent être surveillés en mesurant la perte de charge pour réguler le mécanisme de décolmatage. Les poussières recueillies sont en principe renvoyées vers la zone de stockage parce que les matières premières qui servent à produire les métaux réfractaires (métaux durs) sont des minéraux de valeur.

Les déchets, les tournures et les mitrilles de métal pour la production de titane de deuxième fusion doivent parfois être libérés des liquides de coupe et de l'huile, ce qui peut être réalisé par séchage dans un four de séchage rotatif. Les conduits éloignent les gaz contenant de l'huile du sécheur et les fait passer à travers un cyclone afin d'enlever les poussières entraînées. Les gaz passent ensuite à travers une post-combustion, qui est alimentée par un brûleur gaz. Les fumées/gaz de combustion sont soit recirculées vers le sécheur, soit conduits à un second cyclone. Après le passage à travers le cyclone, un sorbant (bicarbonate de sodium) est introduit afin de neutraliser l'effluent gazeux. Pour finir, le gaz passe à travers un unité de filtres céramique avant d'être rejeté à l'atmosphère par une cheminée. Un exemple détaillé de cette technologie est présenté dans la partie de ce document consacrée aux ferroalliages.

L'acide fluorhydrique est utilisé dans plusieurs procédés pour produire des métaux réfractaires tels que le Ta et le Nb. La manipulation du HF réclame des mesures de précaution pour la santé et la sécurité au travail, parce qu'il est admis que le HF est agressif et très toxique. Une condition requise essentielle pour la santé et la sécurité des ouvriers par exemple est le fait d'avoir à disposition en permanence une solution de digluconate de calcium en tant que premiers soins dans le cas d'un contact cutané.

8.3.2 Procédés de fusion, de cuisson, de réduction par l'hydrogène et de carburation

Dans la production des métaux réfractaires, de la poudre de métal dur et des carbures, l'une des étapes les plus importantes est la réduction des oxydes métalliques. Suivant l'agent réducteur, divers types de systèmes de fusion respectivement réducteurs (tels que des creusets de réaction ou des fours à poussoir dans lesquels on utilise de l'hydrogène en tant qu'agent réducteur) sont des techniques considérées. Le tableau suivant donnera une vue d'ensemble de ces fours.

Système de cuisson, de fusion ou de réduction	Métal produit	Collecte et dépollution des gaz	Avantages	Inconvénients
Four à arc électrique			<ul style="list-style-type: none"> • Refusion des métaux de deuxième fusion 	
Cuve de cuisson (Creuset)	Cr	Hotte fermée mobile raccordée à un filtre à manches		
Four à poussoir	Poudre de Ta, de W Carbures de W, Ta	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Production de poudre de métal réfractaire • Production de carbures de métal réfractaire par carburation • Production quasi continue 	<ul style="list-style-type: none"> • La matière première doit être chargée dans de petits dispositifs de confinement dénommés nacelles
Four à bande	Poudre de Ta, de W Carbures de W, Ta	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de chargement et de déchargement des nacelles • Production continue • Entièrement automatisé 	
Four rotatif	Poudre de W	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Production de poudre de tungstène métal 	
Four en discontinu	Carbures de Ta et de W	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Production de carbures de métaux réfractaires par carburation 	<ul style="list-style-type: none"> • La matière première doit être chargée dans des dispositifs de confinement
Four à bombardement électronique	Fusion de Nb, Ta, Mo, W et Ti	Système d'extraction sous vide, de condensation et d'épuration	<ul style="list-style-type: none"> • Haute puissance calorifique • Très haute température • Creuset inerte refroidi à l'eau • Atmosphère régulée • Faible volume d'effluents gazeux 	<ul style="list-style-type: none"> • Haute consommation d'énergie spécifique • Faible vitesse de fusion
	Raffinage de V, Nb, Ta, Hf et Zr	Système d'extraction sous vide, de condensation et d'épuration	<ul style="list-style-type: none"> • Elimination de C, O, N, H et de diverses autres impuretés 	

Tableau 8.10: Résumé des avantages et des inconvénients des systèmes de fusion utilisés dans la production des métaux réfractaires

EXEMPLE 8.02 PRODUCTION DE POUDRE DE TUNGSTENE ET DE CARBURE DE TUNGSTENE

Ce paragraphe met en évidence les règles de bonne pratique pour la production de la poudre de tungstène métal et des carbures de tungstène. La même technique peut également être utilisée pour produire du tantale métal ou une autre poudre de métal réfractaire.

Description : - L'installation produit de la poudre de tungstène métal. On utilise du paratungstate d'ammonium (PTA) comme matière première et on le calcine en oxyde jaune et en oxyde bleu (WO_3 ou W_2O_5). Par la suite, on réduit l'oxyde jaune et l'oxyde bleu en poudre de tungstène métal en utilisant de l'hydrogène comme agent réducteur. La réduction a lieu dans un four à bande automatisé moderne qui est équipé d'un système fermé dans lequel l'excès d'hydrogène est directement recyclé. Un condenseur sert à séparer l'eau et les poussières entraînées. Les poussières (poudre de métal dur) sont recyclées. La poudre de tungstène métal peut ensuite être transformée par carburation en carbure de tungstène.

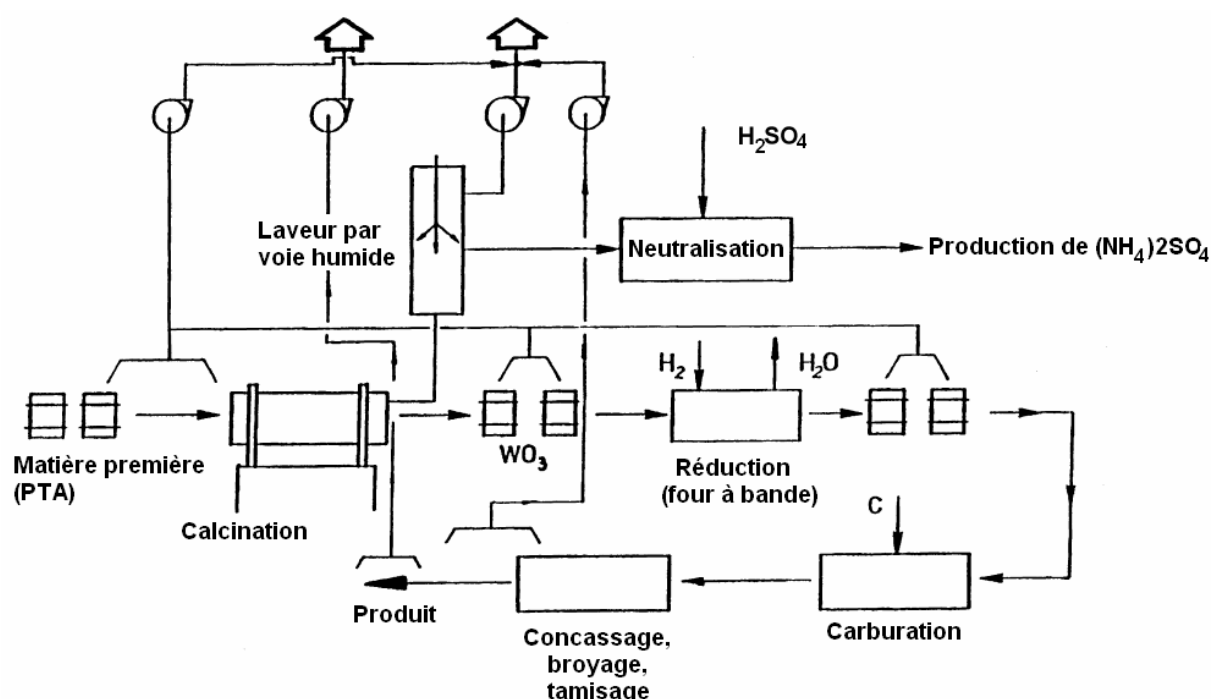


Figure 8.12 : Production de poudre de tungstène et de carbure de tungstène

Principaux bénéfices environnementaux : - Deux filtres à manches nettoient l'air aspiré recueilli par des hottes appropriées et l'équipement de procédé. Les poussières qui sont recueillies par le filtre consistent presque à 100 % en poudre de tungstène et sont recyclées dans le procédé de production.

Étape de procédé	Poussières après dépollution mg/Nm ³
Manipulation des matières premières	< 4
Calcination	< 4
Four de réduction (Four à bande)	< 2
Réduction en poudre	< 4
Manipulation du produit	< 4

Tableau 8.11 Émission de poussières après dépollution

Données opérationnelles : - Non disponibles.

Effets croisés : - Une petite quantité de liquide de lavage provenant du laveur humide doit être neutralisée et traitée. Pas d'autres effets croisés importants.

Aspects économiques : - Non disponibles.

Applicabilité : - Toutes les productions nouvelles ou existantes de carbure et de poudre de métal dur.

Documents de référence : - [tm181, UBA Wien 1999]

8.3.3 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques de collecte et de dépollution des fumées examinées dans le chapitre 2 de ce document sont des techniques à prendre en compte pour la production des métaux réfractaires. Les filtres à manches et les laveurs humides sont normalement utilisés pour dépoussiérer les effluents gazeux des procédés.

Il existe un certain nombre de modèles de filtres à manches différents utilisant divers types de média filtrants, qui en principe permettent tous d'atteindre, pour la production des métaux réfractaires, des valeurs d'émissions très faibles, c'est-à-dire des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm³. L'utilisation de techniques de filtration modernes, telles que le filtre à membrane (filtration de surface), se traduit en plus par une plus longue durée de vie des manches, par une tenue thermique élevée (jusqu'à 260°C) et par des coûts d'entretien relativement bas associés à de très faibles émissions de poussières. Du fait du faible volume d'effluents gazeux lors de la production de carbure de métal et de poudre de métal dur, atteindre des concentrations d'émissions de poussières dans la plage de moins de 1 - 4 mg/Nm³ est possible avec les matériaux filtrants modernes. De faibles émissions de poussières sont intéressantes tant du point de vue environnemental que d'un point de vue économique, parce que les carbures et la poudre de métal dur sont des produits de valeur. Néanmoins, il est important de maintenir de faibles émissions de poussières de métal dur, notamment lorsque l'on recycle des déchets de tungstène contenant du cobalt, afin de protéger la zone de travail et de réduire ainsi au minimum le risque d'atteinte à la santé.

Les filtres à manches sont dans de nombreux cas dans l'industrie métallurgique des filtres sous pression avec des ventilateurs du côté des fumées/gaz sales. De récents développements ont conduit à un filtre à aspiration fermée avec des ventilateurs du côté des gaz propres. Ceci combine les avantages d'un décolmatage doux des manches, ce qui signifie une plus longue durée de vie pour les manches, de faibles coûts de fonctionnement et d'entretien et, en raison du filtre fermé, un volume de gaz délimité [tm 144, Elkem, 1998].

On utilise des systèmes de capotage pour recueillir les effluents gazeux des procédés, en particulier les fumées qui proviennent de la fusion des métaux et les poussières là où de la poudre de métal dur et des carbures de métal sont produits. Les systèmes de capotage sont par conséquent des techniques à prendre en compte également pour réduire au minimum les émissions fugitives. La conception du système de capotage doit tenir compte de l'accès pour le chargement et pour d'autres opérations au niveau du four et de la façon dont la source des gaz du procédé évolue au cours du cycle du procédé.

8.3.4 Régulation du procédé

Les principes de régulation de procédé examinés dans le chapitre 2 sont applicables aux procédés de production utilisés dans ce groupe.

8.3.5 Eaux usées

Les systèmes de traitement existants sont considérées comme étant de haut niveau. Toutes les eaux usées devraient être traitées afin de les débarrasser des solides et des métaux dissous. Les techniques énumérées dans le chapitre 2 sont les techniques à prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées incluant l'eau de pluie sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

Un traitement de l'eau est nécessaire dans les procédés utilisant des laveurs humides et dans les procédés de granulation, parce que les solides en suspension devraient être séparés avant que l'eau ne soit remise en circulation. Pour parvenir à des valeurs acceptables de composés nocifs, il peut dans certains cas être nécessaire de traiter davantage la purge qui doit être retirée du cycle d'eau de lavage. Ceci peut être réalisé en utilisant des filtres à sable, des filtres carbonés ou en ajoutant des produits chimiques appropriés pour faire précipiter les composés nocifs.

8.3.6 Résidus de procédés

Les procédés et les voies de recyclage qui ont été examinés plus haut dans cette section sur les niveaux actuels d'émissions et de consommations pour les divers métaux réfractaires sont des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Le facteur le plus important pour réduire l'impact que produit sur l'environnement le rejet de résidus sous forme de déchets sont les mesures intégrées aux procédés qui se traduisent par la production de moins de résidus. Si la quantité des résidus de procédés est réduite au minimum en utilisant des mesures primaires, les résidus restant devraient être recyclés ou réutilisés autant que possible. Les matières spécifiques constituant a charge influenceront sur le choix de procédé final. Les techniques examinées dans le chapitre 2 devraient également être prises en compte conjointement avec ces procédés.

8.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production des métaux réfractaires : la poudre de métal dur et des carbure de métal, les poussières et la fumée, les composés de métal et métal dur sous forme solide, les eaux usées, des résidus tels que les poussières des filtres, les boues et le laitier. Des produits chimiques de traitement tels que le fluorure d'hydrogène (HF) que l'on utilise pour produire le tantale et le niobium sont très toxiques, ce dont on doit tenir compte lors de la manipulation et du stockage de ces matières ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et a déterminé dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux Etats membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifiques devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales

8.4.1 Manipulation et stockage de matériaux

Les conclusions tirées pour les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne la manipulation et le stockage des matériaux et présentées dans la section 2.17 de ce document sont applicables aux matériaux de ce chapitre. De plus, les techniques suivantes en matière de stockage et de manipulation des matériaux sont également des MTD pour ce secteur.

- Caractérisation des matières premières avant leur réception afin que l'on puisse tenir compte les difficultés au niveau de la manipulation, du stockage et du procédé.
- Le tétrachlorure de titane pur doit être déchargé des wagons citernes ou des camions citernes avec de l'argon et être stocké sous une atmosphère d'argon. Les réservoirs de stockage doivent être pourvus d'évents connectés à un gazomètre à argon par l'intermédiaire d'un piège froid pour récupérer tout TCT dans le circuit de ventilation.
- Les vapeurs d'acide évacuées des réservoirs de stockage devraient être traitées avant d'être rejetées à l'atmosphère.
- Echantillonnage et analyse des matières premières de façon à ce que les options du procédé puissent être définies pour une matière première particulière et de façon à ce que les matières premières radioactives puissent être identifiées.
- L'acide fluorhydrique est utilisé dans plusieurs procédés pour produire des métaux réfractaires tels que le Ta et le Nb. La manipulation du HF exige des mesures de précaution pour la santé et la sécurité au travail, parce qu'il est admis que cette substance est agressive et très toxique. Une condition requise essentielle pour la santé et la sécurité des ouvriers par exemple est le fait de disposer en permanence d'une solution de digluconate de calcium en tant que premiers soins dans le cas d'un contact cutané.

8.4.2 Sélection d'un procédé

8.4.2.1 Procédé de fusion, de cuisson, de réduction par l'hydrogène et de carburation

Selon les divers métaux réfractaires produits et l'impact sur l'environnement des procédés, qui sont largement influencés par le système de fusion, de réduction et de carburation utilisé, les systèmes de production suivants sont considérés comme les MTD pour ce secteur. Les fours considérés sont en général tous applicables aux usines nouvelles et existantes. Pour la production de poudre de métal dur à partir de matière première secondaire et de déchets de métal dur, le procédé au zinc est attrayant d'un point de vue économique et, du point de vue environnemental, à faible risque potentiel.

Type de four	Métal produit	Collecte et dépollution des gaz	Remarques
Chambre de réaction (cuve de cuisson)	Cr produit par réduction métallothermique	Hotte fermée mobile raccordée à un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> La récupération de l'énergie thermique ne sera pas pratiquée, parce que la réduction métallothermique se déroule selon un procédé discontinu, qui ne nécessite qu'un temps de réaction court.
Four à poussoir	Poudre de Ta, de W Carbures de W, Ta	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Le four de réduction d'oxydes métalliques est équipé d'un système fermé dans lequel l'excès d'hydrogène est directement recyclé. On utilise un condenseur pour séparer l'eau et les poussières entraînées. Les poussières (poudre de métal ou de carbure) sont réutilisées. Chaque four a besoin d'une purge à l'azote Le bras du chargeur doit être fermé hermétiquement afin de fermer l'entrée du tube hermétiquement. Les nacelles sont vidées au dessus d'un tamis dans des fûts
Four à bande	Poudre de Ta, de W Carbures de W, Ta	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Le four de réduction d'oxydes métalliques est équipé d'un système fermé dans lequel l'excès d'hydrogène est directement recyclé. On utilise un condenseur pour séparer l'eau et les poussières entraînées. Les poussières (poudre de métal dur) sont réutilisées. Chaque four a besoin d'une purge à l'azote
			•
Four rotatif	Poudre de W	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Le four de grillage est fermé hermétiquement afin d'empêcher la sortie de la fumée et des poussières. Lorsque l'on produit de la poudre de tungstène dans le four rotatif, l'évacuation se fait dans une chambre fermée où la poudre est purgée à l'azote. La poudre est ensuite évacuée dans des bidons qui sont maintenus sous azote.
Four en discontinu	Carbures de Ta et de W	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Le système d'extraction doit pouvoir traiter des volumes d'effluents gazeux variables
Four électrique sous vide	Fusion de métaux réfractaires de deuxième fusion provenant de déchets par exemple titane	Filtre à manches Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> La récupération d'énergie peut n'être possible qu'à partir du cycle d'eau de refroidissement
Four à bombardement électronique	Fusion de Nb, Ta, Mo, W et Ti	Système d'extraction sous vide, de condensation et d'épuration	<ul style="list-style-type: none"> Consommation d'énergie élevée La récupération d'énergie peut n'être possible qu'à partir du cycle d'eau de refroidissement Zr et Hf sont également associés à des métaux radioactifs (uranium, polonium et thorium) qui peuvent être présents dans les résidus
	Raffinage de V, Nb, Ta, Zr et Hf	Système d'extraction sous vide, de condensation et d'épuration	

Tableau 8.12: Fours considérés comme MTD pour la production des métaux réfractaires

8.4.2.2 Régulation du procédé

Les techniques présentées dans les diverses sections du chapitre 2 décrivant les possibilités de régulation du procédé par des systèmes informatisés feront partie des MTD pour ce secteur. On considère que les plus importantes sont :

- Régulation du fonctionnement du four pour optimiser les conditions de fonctionnement. Les paramètres clés sont la pression et la température au niveau de divers points dans le four et le système de manipulation des gaz, les concentrations d'hydrogène et d'oxygène, le temps de séjour et la pression du système ;
- Régulation du procédé au moyen de méthodes pertinentes de sorte qu'il est possible de maintenir des conditions de fonctionnement au niveau optimal et de fournir des alarmes pour les conditions qui sont en dehors de la plage de fonctionnement acceptable ;
- Les opérateurs de l'usine devraient être formés et avoir reçu des instructions au sujet des procédures de fonctionnement et des paramètres de commande corrects.
- Utilisation de règles de bonnes pratiques d'entretien pour l'installation de traitement, les systèmes de dépollution et les autres procédés associés. Un système d'inspection devrait être adopté.

8.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques présentées dans le chapitre 2 concernant les techniques de collecte des effluents gazeux ainsi que les techniques de dépollution de l'air feront partie des MTD pour ce secteur. Selon les techniques à prendre en compte qui sont présentées pour la collecte et la dépollution des fumées/gaz, les MTD pour ce secteur sont les suivantes :

- Un système d'extraction pour prendre les fumées et les poussières des fours de calcination fusion réduction et carburation ;
- Les filtres à manches sont les MTD pour épurer les effluents gazeux provenant des chambres de réaction et des étapes de manipulation des matières premières et des produits pour la production de chrome métal, lorsqu'une concentration de matière particulaire résiduaire inférieure à 5 mg/Nm^3 peut être atteinte. La partie représentée par le chrome et ses composés est inférieure à $1 - 2 \text{ mg/Nm}^3$;
- Les filtres à manches sont les MTD pour épurer les effluents gazeux provenant des fours de calcination, de réduction et de carburation et des étapes de manipulation des matières premières et des produits, lorsque la plage associée de concentration de matière particulaire résiduaire de poudre de carbure et de métal est inférieure à $1 - 5 \text{ mg/Nm}^3$;
- Pour des composés métalliques tels que le nickel, le vanadium, le chrome, le manganèse etc. en tant qu'élément de la fumée et des poussières totales, les émissions sont, selon la nature nocive du métal, beaucoup moins élevées que les émissions de poussières associées. Plusieurs matières premières secondaires ont ou contiennent également des métaux et des composés métalliques toxiques qui peuvent être émis du procédé et doivent donc être réduits. Le niveau associé pour les composés du nickel et du cobalt par exemple est inférieur à 1 mg/Nm^3 ;
- Pour la production de poudre de métal ou de carbures de métal, le système des effluents gazeux peut être conçu sous la forme d'un système fermé, où les poussières peuvent seulement s'échapper par élimination périodique du système de capture. La petite quantité de poussières peut ensuite être recyclée en totalité dans le procédé ;
- Si on utilise un laveur humide pour épurer les effluents gazeux provenant de la production de poudre de métal, la quantité de poudre enlevée est séparée de l'eau par décantation, séchée et recyclée. Du fait de l'énergie supplémentaire et de la nécessité de traiter les eaux usées, on devrait de préférence utiliser le système sec.

- Les émissions d'ammoniac provenant du four de calcination peuvent être réduites au moyen d'un laveur humide et par une neutralisation ultérieure avec H_2SO_4 . On peut également récupérer l'ammoniac pour la production de PTA.
- Les fumées d'ammoniac provenant du PTA calcinant dans un réacteur fermé hermétiquement ne peuvent s'échapper qu'en raison d'un défaut de joint d'étanchéité ; à ce moment l'alimentation et le chauffage sont arrêtés et le joint d'étanchéité réparé. Les fumées d'ammoniac gagneront l'évent à l'air libre si un défaut du dispositif de chauffage n'est pas détecté, ce que l'utilisation de plusieurs brûleurs et de plusieurs alarmes de brûleurs permet d'éviter.
- Les émissions d'ammoniac provenant de la production du tantale, qui ont également une odeur très intense, peuvent être réduites par épuration en milieu acide pour lequel les niveaux d'émissions associés sont en dessous de 60 mg/Nm^3 .
- Le fluorure d'hydrogène (HF) est une substance chimique très toxique et il doit donc être manipulé et utilisé avec précaution. En utilisant des techniques modernes, le niveau associé d'émissions de fluorure d'hydrogène est en dessous de 1 mg/Nm^3 .
- On utilise de préférence des systèmes de capotage appropriés raccordés à un filtre à manches pour recueillir et nettoyer les fumées et les poussières provenant de tous les stades de manipulation et de réduction en poudre des matières premières et de manipulation des produits.

Le tableau suivant récapitule l'émission captée associée à l'utilisation d'une meilleure technique disponible et les techniques que l'on peut utiliser pour parvenir à ces niveaux.

Polluant	Émissions associées à l'utilisation de MTD	Techniques pouvant être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	$< 5 \text{ mg/Nm}^3$	Filtre à manches	
Métaux lourds	Cr et ses composés $1 - 2 \text{ mg/Nm}^3$ Ni et Co $< 1 \text{ mg/Nm}^3$	Filtre à manches	Les filtres à manches de haute performance (par exemple, à membrane) permettent d'atteindre de faibles teneurs en métaux lourds. La concentration de métaux lourds est liée à la concentration de poussières et à la proportion que représentent les métaux dans les poussières.
NH_3	$< 60 \text{ mg/Nm}^3$	Épuration par voie humide et neutralisation ultérieure avec H_2SO_4	Pour la production de tantale Lors de la production de carbure de métal et de poudre de métal tungstène, on peut également récupérer du NH_3 pour la production de PTA
HF	$< 1 \text{ mg/Nm}^3$	Système d'épuration par voie humide	Le fluorure d'hydrogène (HF) est une substance chimique très toxique et il doit donc être manipulé et utilisé avec précaution.
Note. Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données sous la forme de moyennes journalières sur la base d'une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où une surveillance continue n'est pas réalisable, la valeur sera la moyenne sur la période d'échantillonnage. Pour le système de dépollution utilisé, on tiendra compte des caractéristiques du gaz et des poussières dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte utilisée.			

Tableau 8.13: Niveaux d'émissions dans l'air associés à l'utilisation de MTD

8.4.4 Eaux usées

Les techniques présentées dans le chapitre 2 en ce qui concerne le traitement des effluents et la réutilisation de l'eau feront partie des MTD pour ce secteur. Selon les techniques à prendre en compte qui sont présentées pour le traitement de l'eau, les MTD pour ce secteur sont définies comme suit :

- Des cycles d'eau fermés sont appropriés pour les laveurs humides, et les systèmes de refroidissement ;
- Les purges provenant des cycles d'eau fermés doivent être traitées afin d'éliminer les composés métalliques et la matière particulaire de l'eau ;
- Les eaux usées traitées devraient être recyclées et réutilisées autant que possible ;
- Les liquides d'épuration devraient également être traités et analysés avant d'être évacués ;
- Confinement des systèmes de drainage des usines lorsque cela est possible et traitement des effluents en fonction de leur contenu avec analyse avant rejet.

8.4.5 Résidus de procédés

Les techniques présentées dans le chapitre 2 en ce qui concerne la réduction des déchets feront partie des MTD pour ce secteur. Selon les procédés qui ont été définis comme techniques appliquées, les manières suivantes pour recycler et réutiliser le laitier, les poussières des filtres et les boues sont considérées comme MTD pour ce secteur :

Métal réfractaire	Résidu	Recyclage, réutilisation et évacuation
Chrome	Poussières Laitier	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières pourraient en partie être réutilisées • On peut réutiliser le laitier pour divers besoins • On peut vendre le laitier de chrome-alumine comme matière première à l'industrie de l'acier et des réfractaires
Manganèse	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont en partie recyclées dans le procédé
Tungstène	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé
Vanadium	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé
Molybdène	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé
Titane	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé • Certains creusets de fours de fusion sont refroidis avec des alliages liquides de sodium-potassium (NaK) et de petites quantités de matière oxydée de cette source sont générées sous la forme de boues. On fait réagir les boues avec de l'eau et le liquide qui en résulte est envoyé à la station d'épuration des effluents
Tantale	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé
Niobium	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé • Laitier provenant de la réduction dans le four sous vide • On sait que le pyrochlore, qui est une source importante de matière première, peut contenir des taux de radioactivité élevés et le procédé de fusion thermique est par conséquent potentiellement polluant sur le plan environnemental en ce qui concerne la mise en décharge du laitier
Rhénium	Poussières	<ul style="list-style-type: none"> • Les poussières sont recyclées dans le procédé • Boues en tant que résidu du procédé de récupération de rhénium dans la solution de lavage qui a été générée par un procédé de grillage de molybdène. Les boues doivent être traitées.
Zirconium Hafnium	Poussières Laitier	<ul style="list-style-type: none"> • Zr et Hf sont également associés à des métaux radioactifs (uranium, polonium et thorium) qui peuvent être présents dans les résidus. Il faut en tenir compte lorsque l'on utilise ou évacue ces résidus.

Tableau 8.14: Recyclage et réutilisation des résidus provenant de la production des métaux réfractaires

8.5 Techniques émergentes

En raison de considérations stratégiques et environnementales, le recyclage des déchets de métaux durs devient de plus en plus important, par conséquent beaucoup de recherches ont été menées dans ce domaine ces dernières années. Des recherches ont été menées sur la dissolution électrolytique sélective pour recycler des déchets de métaux durs, mais on ne dispose pas d'informations détaillées pour décrire le stade actuel de ces développements.

Il est très difficile d'obtenir des informations supplémentaires sur la mise au point de nouveaux procédés et sur les améliorations apportées aux fours, parce que ce sont parfois les sociétés qui produisent les métaux durs qui réalisent directement les développements et les améliorations de procédés, lesquels seront alors couverts par le secret commercial.

9 FERROALLIAGES

Les ferroalliages sont principalement utilisés comme alliages mères dans l'industrie du fer et de l'acier, car c'est la manière la plus économique d'introduire un élément d'alliage dans le bain d'acier. De plus, des ferroalliages spéciaux sont également nécessaires à la production d'alliages d'aluminium et comme matière première dans des réactions chimiques spécifiques.

En tant qu'additif dans la production de l'acier, les ferroalliages améliorent les propriétés, en particulier la résistance à la traction, la résistance à l'usure et à la corrosion. L'effet des propriétés améliorées de l'acier grâce à l'utilisation de ferroalliages comme élément d'alliage dépend plus ou moins des influences suivantes [tm 107, Ullmanns 1996] :

- un changement de la composition chimique de l'acier ;
- l'élimination ou l'immobilisation des impuretés nocives telles que l'oxygène, l'azote, le soufre ou l'hydrogène ;
- un changement de la nature de la solidification, par exemple, après inoculation.

En fonction de la matière première qui est utilisée (matière première primaire ou secondaire), la production de ferroalliages peut être réalisée sous la forme d'un procédé primaire ou secondaire. Les principales réactions chimiques régissant les deux procédés peut être décrite comme suit.

Procédés primaires :

Minerai de métal oxydé + minerai/déchets de fer + agent réducteur → ferroalliage + oxyde d'agent réducteur + laitier

Procédés secondaires :

Déchets de métal + déchets de fer → ferroalliage

De nos jours, les ferroalliages primaires sont principalement produits par la réduction soit carbothermique soit métallothermique de minerais ou de concentrés oxydés. Le procédé le plus important est la réduction carbothermique dans laquelle du carbone, sous la forme de coke (coke métallurgique), de charbon ou de charbon de bois, est normalement utilisé comme agent réducteur. Quand un haut fourneau est utilisé, du coke est également nécessaire en tant que source d'énergie.

La réduction métallothermique est principalement réalisée avec soit du silicium soit de l'aluminium en tant qu'agent réducteur. Les équations chimiques suivantes montrent les principes de base des voies de production carbo et métallothermique.

Réduction carbothermique : Oxyde métallique + Carbone → Métal + Monoxyde de carbone

Réduction silicothermique : Oxyde métallique + Silicium ↔ Métal + Oxyde de silicium

Réduction aluminothermique : Oxyde métallique + Aluminium → Métal + Oxyde d'aluminium

9.1 Procédés et techniques appliqués

En fonction de la capacité de production, les ferroalliages peuvent se diviser en deux catégories principales : les alliages courants et les alliages spéciaux. Les ferroalliages courants (ferro-chrome ferro-silicium, ferro-manganèse silico-manganèse et ferro-nickel) représentent environ 90 % de la production totale des ferroalliages de l'Union européenne.

En comparaison avec les ferroalliages courants, la capacité de production des ferroalliages spéciaux est relativement petite. Les ferroalliages spéciaux (ferro-vanadium, ferro-molybdène, ferro-tungstène ferro-titane ferro-bore, et ferro-niobium) sont principalement utilisés dans l'industrie du fer, de l'acier et de la fonte. De plus, certains ferroalliages spéciaux sont également de plus en plus utilisés dans d'autres secteurs industriels, par exemple l'industrie de l'aluminium et l'industrie chimique.

9.1.1 Ferro-chrome

Le ferro-chrome, avec le nickel (ferro-nickel), est l'élément d'alliage majeur dans la production de l'acier inoxydable. L'acier inoxydable est utilisé dans une variété de domaines allant de la coutellerie aux pales des turbines des moteurs d'avion.

La teneur en chrome du ferro-chrome varie normalement de 45 à 75 %, conjointement avec diverses quantités de fer, de carbone et autres éléments d'alliage. L'utilisation du ferro-chrome dépend largement de la teneur en carbone, le ferro-chrome peut donc être classé comme suit.

Ferro-chrome à teneur élevée en carbone (HC FeCr) avec de 4 à 10 % de C (« ferro-chrome carburé »)

Ferro-chrome à teneur moyenne en carbone (MC FeCr) avec de 0,5 à 4 % de C (« ferro-chrome affiné »)

Ferro-chrome à faible teneur en carbone (LC FeCr) avec de 0,01 à 0,5 % de C (« ferro-chrome suraffiné »)

9.1.1.1 Matières premières

La matière première principale servant à produire le ferro-chrome est le minerai de chromite, qui est un minéral contenant de l'oxyde de fer et de l'oxyde de chrome. Le rapport entre le Cr et le Fe dans le minerai de chromite détermine la teneur en chrome de l'alliage produit, par exemple un rapport Cr/Fe élevé est avantageux pour la production d'un ferroalliage ayant une teneur élevée en chrome. Le minerai et les concentrés de chromite sont utilisés sous la forme de morceaux compacts et morceaux friables, ainsi que sous la forme de fines de chromite.

En fonction des différentes voies de production et de la teneur souhaitée en carbone du ferro-chrome, du carbone ou du silicium est utilisé comme agent réducteur. Pour la production de HC FeCr, du carbone est ajouté au procédé en tant qu'agent réducteur sous la forme de coke métallurgique, de charbon ou de charbon de bois. Le coke métallurgique est l'agent réducteur le plus courant. Il est important qu'un coke ayant une teneur faible en phosphore et en soufre soit utilisé car 60 à 90 % du phosphore et 15 à 35 % du soufre sont transférés dans le métal. Pour la production de LC FeCr, du ferro-silico-chrome et du ferro-silicium sont utilisés dans une réduction silicothermique comme agents réducteurs et matière première.

Afin d'obtenir une analyse correcte des métaux, une bonne récupération des métaux et un fonctionnement satisfaisant du four, des matériaux auxiliaires tels que du quartzite, de la bauxite, du corindon, de la chaux et de l'olivine peuvent être ajoutés au lit de fusion en tant que fondants.

9.1.1.2 Techniques de prétraitement

La chromite est utilisée comme matière première pour la production du ferro-chrome sous la forme de minerai en morceaux, de fines et de concentrés. Il convient de noter qu'environ 70 à 80 % des sources de chromite sur la planète sont disponibles sous forme de fines (< 10 mm). Pour convertir les fines et les concentrés du minerai en matériau pouvant être introduit dans un four, ils doivent tout d'abord être agglomérés par briquetage, granulation/frittage ou frittage.

L'agglomération est nécessaire pour obtenir de bonnes récupérations et également pour donner un lit de fusion perméable, qui permette au gaz provenant de la zone de réaction de s'échapper.

Les briquettes sont fabriquées par compression ou mise en forme d'un mélange de minerais avec un liant ajouté pour donner une forme et une taille adéquates. Les briquettes sont utilisées dans le four après durcissement du liant ajouté, mais sans traitement thermique. Cette méthode peut être utilisée pour les matériaux ayant une distribution granulométrique relativement large de moins de 5 mm.

Les granulés crus sont fabriqués par laminage de minerai humide à fine granulométrie avec une addition d'un liant et de poussier de coke à fine granulométrie sous forme de boulettes dans un tambour rotatif ou sur un disque. Elles sont ensuite frittées dans un four à convoyeur en acier ou dans un four à cuve pour former des granulés poreux et durs ayant des propriétés physiques et chimiques constantes. Le poussier de coke dans les granulés avec une ajout de gaz de four est utilisé comme combustible pour le frittage.

Le frittage est adéquat pour une taille des particules dans la plage de 0,1 à 3 mm. Du poussier de coke est ajouté au mélange de minerais, mais aucun liant n'est ajouté. Le mélange est placé sur une grille et le poussier de coke est enflammé. La chaleur provenant de la combustion du poussier de coke produira un gâteau de frittage des minéraux formant la gangue du minerai. Ce gâteau doit ensuite être concassé pour former un matériau en morceaux d'une taille adéquate.

Quand un traitement thermique (frittage) est impliqué, les gaz émis par le procédé doivent être épurés dans des laveurs en cascade ou des filtres à manches. Pour tous les procédés d'agglomération, les poussières de matières premières collectées issues de ces procédés ou d'autres procédés de manutention des matières premières, peuvent être recyclées.

9.1.1.3 Production de ferro-chrome et de silico-chrome

9.1.1.3.1 Ferro-chrome à teneur élevée en carbone

Le ferro-chrome à teneur élevée en carbone (HC FeCr) est produit presque exclusivement par réduction carbothermique directe du minerai de chromite dans des fours à arc électrique (FAE) immergé triphasé ayant un fonctionnement continu. La charge de fusion peut être préchauffée dans un four vertical ou rotatif en utilisant le CO gazeux issu du procédé de fusion. Une pré-réduction dans un four rotatif est également possible. Dans les deux cas la consommation spécifique d'énergie électrique sera réduite. Des fours à arc électrique immergé fermé, semi-fermé ou ouvert, y compris les fours à plasma fonctionnant en C.A. (courant alternatif) triphasé et en C.C. (courant continu) monophasé sont utilisés. Le four à arc C.C. comprend une électrode de graphite creuse unique.

Les fours à arc immergé utilisent des électrodes Soderberg où l'électrode peut être constituée par une pâte chaude, des briquettes, des blocs ou des viroles contenant la pâte. La pâte de l'électrode est chargée en haut de l'électrode selon sa consommation. Le matériau est soumis à une chaleur croissante au fur et à mesure qu'il descend dans la virole de l'électrode. Il fond à environ 80 °C et cuit à 500 °C. Pour réguler le procédé de fusion, le fonctionnement du four peut être basé sur la régulation de la résistance ou du courant, de sorte que les électrodes soient élevées et abaissées au besoin pour garder la résistance ou le courant constant. Ceci implique l'application de certaines conditions au niveau du scellement de l'électrode pour prévenir toute fuite d'air dans le four. Comme variante, une autre façon de procéder est couramment utilisée, où l'électrode ne se déplace que pendant le glissement et sinon reste en place.

Pendant le procédé de fusion les oxydes métalliques sont réduits par le coke, avec les carbures métalliques représentant le produit final. La réduction produit des volumes importants de CO gazeux provenant de la zone de réaction sous les extrémités d'électrode. Dans un four ouvert le CO est brûlé à la surface du four. En utilisant un four étanche fermé, le volume d'effluent gazeux peut être réduit d'un facteur de 50 à 75 et par un facteur de 10 à 20 dans le cas d'un four semi-fermé. Le coût d'investissement pour les systèmes de traitement des effluents gazeux pour les fours fermés sont biens inférieurs à ceux des fours ouverts. Le CO épuré peut être utilisé comme combustible pour le préchauffage des matières premières, le séchage du coke et les procédés similaires, remplaçant le fuel ou d'autres combustibles fossiles. L'énergie peut être récupérée à partir des fours semi-fermés sous la forme de vapeur d'eau ou d'eau chaude.

Le ferro-chrome et le laitier sont recueillis à intervalles réguliers à partir des trous de coulée situés près du fond du four. Le laitier et le métal sont recueillis à travers le même trou de coulée en utilisant une vidange en cascade dans la même cuve métallique. Le laitier de densité inférieure flottera sur le dessus et finira par déborder par le déversoir en poche dans la poche à laitier ou via un chenal de coulée secondaire dans un crassier, un bassin-granulateur ou une autre cuve à laitier. De façon moins fréquente le métal est recueilli directement dans la zone de coulée. Après que le laitier est écrémé, le métal en fusion est coulé. La coulée en lit et la coulée en couche sont les méthodes les plus fréquemment utilisées de coulée du ferro-chrome en raison de la simplicité et des faibles coûts de ces méthodes. Les coulées refroidies sont concassées et tamisées sur la ligne de manutention du produit pour produire le lot commercial spécifié par les clients. Si cela est possible, le ferro-chrome liquide peut également être transféré directement dans une usine de fabrication d'acier inoxydable adjacente.

Le laitier peut être soit granulé avec un jet d'eau à haute pression soit coulé à l'extérieur en couches, refroidi, concassé et tamisé. Le laitier qui contient du métal est également concassé et la partie métallique récupérée au moyen d'une séparation laitier-métal. Le métal qui est récupéré en morceaux exempt de laitier peut être vendu, tandis que le métal et les fines contaminés par le laitier sont généralement recyclés dans le procédé de fusion. Le laitier granulé et le laitier en morceaux sont réutilisés comme matériau de construction pour les bâtiments et les routes.

Un exemple de procédé de production de ferro-chrome à teneur élevée en carbone utilisant un four à arc électrique immergé fermé est montré sur la figure suivante.

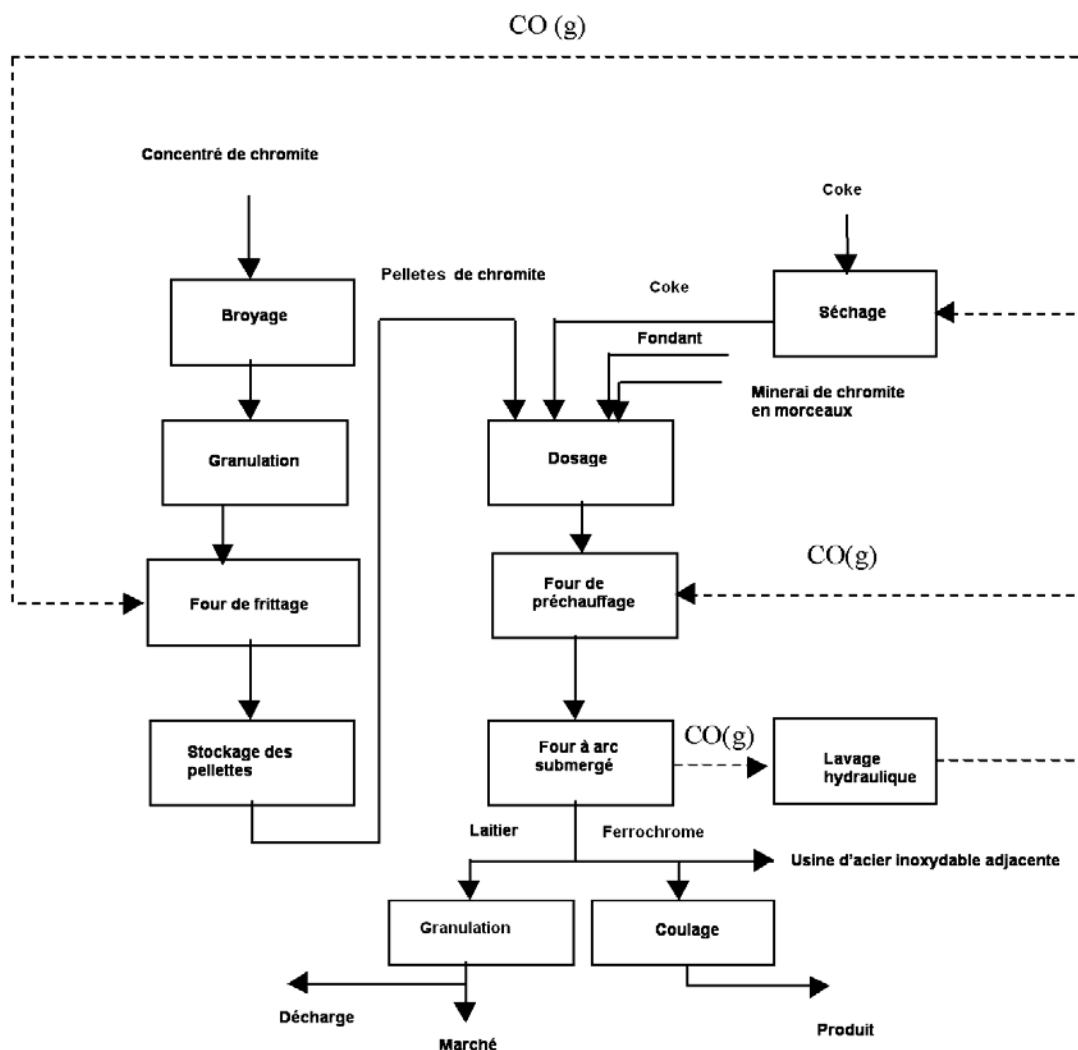


Figure 9.1 : Production de ferro-chrome à teneur élevée en carbone utilisant un four fermé [FIGURE : submergé → immergé]

En raison de la disponibilité élevée des fines de chromite, la technologie d'arc C.C. (courant continu) a été développée pour la fusion des fines de chromite sans agglomération préalable. Le principe est un procédé de bain ouvert à arc transféré où le four est équipé d'une électrode de graphite creuse unique pour le chargement des fines de minerai de chromite, des fines d'agent réducteur et des fondants. Le minerai de chrome peut être efficacement préchauffé, par exemple dans un système à lit fluidisé. L'utilisation de l'énergie des effluents gazeux peut réduire la consommation d'énergie électrique par unité produite.

9.1.1.3.2 Ferro-chrome à teneur moyenne en carbone

Le ferro-chrome à teneur moyenne en carbone (MC FeCr) peut être produit par la réduction silicothermique de minerai et de concentrés de chromite ou par la dé-carburisation du HC FeCr dans un convertisseur à oxygène. L'oxygène peut être introduit dans le métal en fusion par le haut du bain en utilisant des lances refroidies à l'eau ou par injection par le fond du convertisseur. Le procédé de soufflage par le fond a l'avantage qu'un taux de dé-carburisation élevé peut être obtenu conjointement avec une récupération élevée du chrome. La température élevée du bain dans un convertisseur à soufflage par le fond affecte le taux élevé de dé-carburisation et de récupération du chrome.

La voie silicothermique est plus économique et donc plus importante de nos jours pour produire du MC FeCr. La raison peut être la petite quantité de MC FeCr qui est nécessaire en comparaison avec la

demande élevée en HC FeCr conjointement avec le fait que le ferro-chrome à faible teneur en carbone peut également être produit par le même procédé.

9.1.1.3.3 Ferro-chrome à faible teneur en carbone

Afin d'obtenir la faible teneur en carbone souhaitée dans le ferro-chrome à faible teneur en carbone, un procédé carbothermique ne peut pas être utilisé. Les procédés les plus couramment utilisés sont donc les réductions métallothermiques connues sous le nom de procédés Duplex, Perrin ou Simplex.

Au moment de la rédaction de ce document, le seul procédé utilisé au sein de la Communauté Européenne pour produire du LC FeCr est le procédé Duplex. Dans ce procédé, le LC FeCr est produit par la réduction silicothermique d'un laitier de chaux-chromite. Le procédé de fusion du laitier a lieu dans un four à arc C.A. inclinable utilisant des électrodes Soderberg. Le four fonctionne à environ 1750 °C. Le liquide est recueilli à intervalles réguliers dans une première poche de réaction. Quand du SiCr, du minerai et de la chaux sont ajoutés dans la poche, le mélange réactionnel est converti en LC FeCr et en un laitier intermédiaire. Au cours de ce procédé, la poche est recouverte d'une hotte d'extraction de fumées. Environ 70 % du laitier intermédiaire sont transférés dans une seconde poche de réaction, qui est également recouverte d'une hotte de captage des fumées. L'addition de Si, de FeSi, de sable et d'acide borique au mélange produit un laitier final et un métal. Le métal est recyclé vers la première poche. Un filtre à manches épure les effluents gazeux provenant du four et des deux poches de réaction. Les poussières provenant du filtre à manches sont recyclées dans le four de fusion. Le procédé Perrin est similaire mais utilise deux fours à arc.

Le LC FeCr peut également être produit par le procédé appelé procédé Simplex. Dans le procédé Simplex le HC FeCr est concassé dans un broyeur à boulets afin d'obtenir une poudre de ferroalliage. Après avoir briqueté la poudre de HC FeCr conjointement avec du Cr_2O_3 , Fe_2O_3 le mélange peut être dé-carburisé par annelage à environ 1350 °C dans un four sous vide.

9.1.1.3.4 Silico-chrome

Le silico-chrome est également utilisé comme élément d'alliage dans l'industrie de l'acier. Il peut être produit dans le même type de fours à arc électrique immergé triphasé que ceux utilisés pour la production du HC FeCr. La réduction du SiO_2 en Si est combinée à la génération de quantités considérables de CO gazeux. Le taux de génération élevé du CO fait qu'il est important d'utiliser un lit de fusion poreux (par exemple coke de gaz), un four semi-fermé ou fermé avec un système de récupération de l'énergie approprié.

9.1.2 Ferro-silicium et alliages de silicium

Le ferro-silicium, le métal de silicium et le silico-calcium (SiCa) sont utilisés comme additifs dans différentes activités industrielles. En tant qu'élément d'alliage, le ferro-silicium augmente la résistance de l'acier et est donc utilisé pour faire fondre l'acier qui est nécessaire pour produire par exemple des câbles métalliques pour les pneus ou des roulements à billes. Le FeSi de haute pureté est utilisé pour produire de l'acier de perméabilité élevée pour les transformateurs électriques. Le métal de silicium est important en tant qu'élément d'alliage dans l'aluminium et pour la production de produits chimiques et d'équipements électroniques. L'utilisateur principal pour le silico-calcium est également l'industrie de l'acier. Les métaux mentionnés ci-dessus peuvent être classés en fonction de leur teneur en silicium comme suit.

Ferro-silicium, teneur en silicium inférieure à 96 %

Métal de Si, teneur en silicium supérieure à 96 %

Silico-calcium, teneur en silicium d'environ 60 à 65 % et teneur en calcium de 30 à 35 %

9.1.2.1 Matières premières

Les matières premières qui sont couramment utilisées pour la production du ferro-silicium, du métal de silicium et du silico-calcium sont listées dans le tableau suivant.

Matière première	Ferro-silicium	Si métal	Silico-calcium
Quartz	■	■	■
Coke	■		■
Coke de pétrole		■	
Charbon	■	■	■
Charbon de bois	■	■	
Copeaux de bois	■	■	
Pierre à chaux			■
Minerai de fer/déchets d'acier	■		
Carbone amorphe		■	
Électrodes de graphite		Si une électrode combinée graphite/Soderberg est utilisée	
Pâte d'électrode Soderberg	■		■

Tableau 9.1 : Matière première pour la production de ferro-silicium, de Si métal et de silico-calcium

Afin d'obtenir de bons résultats en termes de production, il est nécessaire de sélectionner avec soin une matière première de qualité. La résistance thermique du quartzite par exemple est d'une importance spéciale, parce qu'elle est reliée à la perméabilité de la charge aux gaz où un matériau trop fin peut empêcher l'écoulement des gaz. La qualité du carbone est importante pour la performance environnementale du procédé, parce que le charbon et le coke contiennent normalement du soufre et certains autres éléments indésirables. Si par exemple le carbone contient du mercure ou autres éléments pouvant être vaporisés, ils s'évaporeront dans le procédé et seront transférés comme partie intégrante des effluents gazeux dans l'environnement.

9.1.2.2 Production de ferro-silicium, de métal de silicium et de silico-calcium

La matière première est normalement fournie à l'usine par camion et train ou est proche de celle-ci. Plusieurs usines de ferro-silicium et de silicium sont situées près de la mer ou d'une rivière où les bateaux sont principalement utilisés pour le transport des matières premières et des produits. Le chargement et le déchargement de la matière première est effectué par utilisation de grues, de chariots élévateurs frontaux ou des camions à bennes basculantes.

Les différentes matières premières qui sont utilisées pour la production du Si, du FeSi et du SiCa sont de préférence stockées sur des surfaces dures afin de prévenir toute contamination. Les agents réducteurs sont normalement stockés à l'intérieur, pour protéger le matériau de l'humidité causée par la pluie. Certains des agents réducteurs peuvent avoir des caractéristiques auto-inflammables. Dans ces cas-là, des manières appropriées de surveiller doivent être mises en œuvre pour éviter l'auto-combustion, par exemple du charbon de bois ou du charbon avec une teneur élevée en matière volatile et les copeaux de bois.

Le ferro-silicium, le métal de silicium et le silicium-calcium sont couramment produits dans des fours à arc électrique immergé triphasé de bas fourneau. Les fours à arc électrique peuvent être de type ouvert ou semi-fermé. Le four tourne normalement par exemple une fois par semaine, afin de connecter les zones de réaction autour de chaque extrémité d'électrode. Ceci permet d'homogénéiser le métal en fusion dans le four et d'économiser de 5 à 10 % d'énergie électrique. La rotation entraîne certaines difficultés dans l'obtention d'une bonne efficacité de la capture des émissions fugitives au niveau du trou de coulée puisque l'emplacement du trou de coulée tourne avec le four. Un four à arc électrique typique pour la production du ferro-silicium est montré sur la figure suivante.

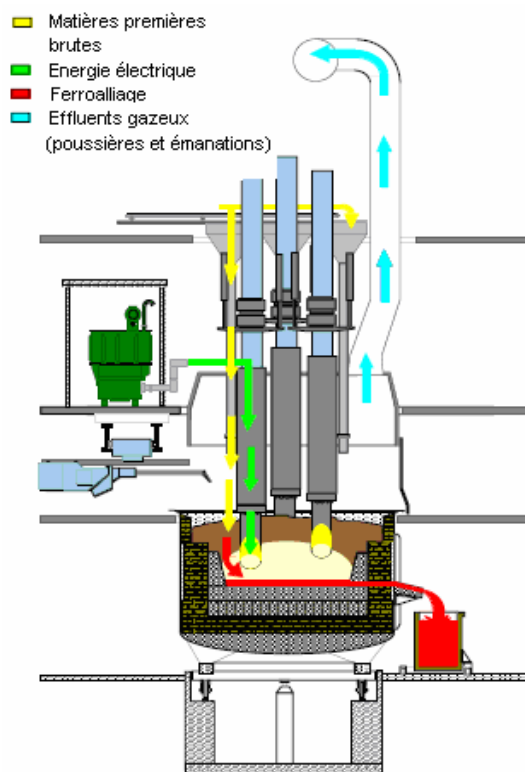


Figure 9.2 : Four à arc électrique pour la production de métal de Si, de ferro-silicium et de CaSi

La matière première est chargée depuis des réservoirs situés au-dessus du four, à travers des tuyaux d'alimentation dans la zone de fusion autour des électrodes. Dans les fours de petite taille, la matière première peut également être alimentée en utilisant des chariots de stockage.

La fusion du métal de silicium et des alliages de silicium a normalement lieu dans des fours ouverts ou semi-fermés. Les fours ouverts sont couramment construits avec des rideaux ou des portes mobiles autour des hottes pour la maintenance du four et éventuellement une alimentation manuelle. La hotte du four est la partie supérieure du four. La hotte remplit plusieurs tâches, tout d'abord elle collecte les effluents gazeux du procédé et protège l'équipement de la chaleur du procédé. Deuxièmement, la hotte est le site pour l'agencement des électrodes, le chargement des matières premières et l'agencement de refroidissement pour le four. Pour la production du FeSi et du CaSi la technologie Soderberg est utilisée. Pour la production du silicium l'électrode est souvent préculée et vissée sur l'électrode précédente selon la consommation de l'électrode. Au cours des récentes années une électrode a été développée en utilisant une combinaison de la technologie Soderberg et d'un cœur en graphite avec une gaine d'électrode en fer stable. Cette électrode combinée permet la mise en œuvre de la technologie Soderberg dans la production du métal de silicium. L'objectif est de réduire les impuretés de fer causées par la gaine d'électrode et de réduire les coûts élevés des électrodes de graphite préculées. Le four semi-fermé a été mis en place pour réguler l'aspiration de l'air dans le haut du four et ainsi réduire le flux gazeux total provenant du four.

Ceci augmente la température du gaz et requiert une régulation de la température améliorée du côté effluents gazeux, mais permet en même temps une récupération encore plus élevée de l'énergie. Les effluents gazeux du procédé contenant de la fumée de silice sont traités dans un filtre à manches.

Le métal liquide est recueilli continûment ou à intervalles réguliers. Le métal est coulé à partir de la poche après que la vidange est finie. Des cuves de vidange transportables peuvent être amenées à la position de vidange par des véhicules adéquats ou par des ponts roulants. Le métal peut également être directement recueilli dans la zone de coulée sans utiliser de cuves de transport. L'alliage de silicium est alors coulé dans des moules et concassé en utilisant des concasseurs à mâchoires, rotatifs ou à rouleaux ou granulé dans de l'eau. Un schéma de procédé pour la production de ferro-silicium, de métal de silicium et de calcium silicium est présenté sur la figure suivante.

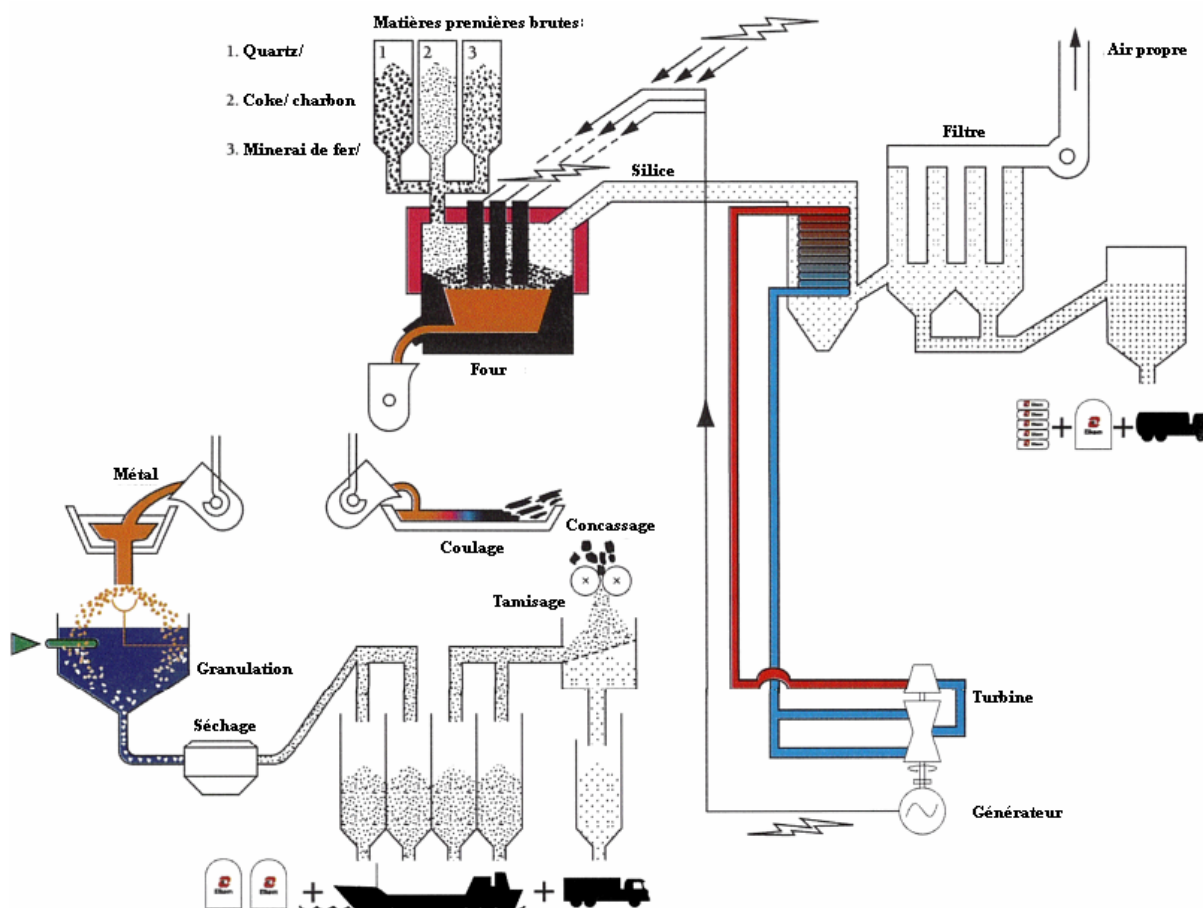


Figure 9.3 : Schéma de procédé pour une production moderne de ferro-silicium et de métal de silicium [tm 152, A. Schei, J.Kr. Tuset, H.Tveit 1998]

Il convient de noter que la production de métal de silicium et de ferro-silicium est un procédé presque exempt de laitier puisque presque toutes les impuretés présentes dans la matière première sont transférées dans les produits, le métal ou la micro-silice. Pour obtenir un métal de pureté supérieure une étape d'affinage supplémentaire est nécessaire. L'affinage a lieu en oxydant les impuretés dans une poche. L'injection de gaz d'oxygène ou d'air est effectuée grâce à des lances immergées, des bouchons perméables dans le bas des poches ou des injecteurs. Un laitier correcteur peut également être ajouté pour améliorer le procédé d'affinage. L'étape d'affinage est recouverte d'un système de collecte des fumées, par exemple une hotte de captage des fumées qui est raccordée à filtre à manches.

9.1.3 Ferro-manganèse et alliages de manganèse

Le ferro-manganèse est un autre ferroalliage courant de grande importance principalement dans l'industrie de l'acier et de l'acier inoxydable. Initialement employé comme agent désoxydant et désulfurisant, de nos jours le ferro-manganèse est principalement utilisé pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure de l'acier. Le ferro-manganèse et autres alliages de manganèse importants peuvent classiquement être classés comme suit :

Ferro-manganèse à teneur élevée en carbone (HC FeMn) avec max 7,5 % de C

Ferro-manganèse à teneur moyenne en carbone (MC FeMn) avec max 1,5 % de C

Ferro-manganèse à faible teneur en carbone (LC FeMn) avec max 0,5 % de C

Silicomanganèse (SiMn) avec max 2,0 % de C

Silico-manganèse à faible teneur en carbone (LC SiMn) avec max 0,05 % de C

9.1.3.1 Matières premières

La production de ferro-manganèse et de silico-manganèse est basée sur un mélange de minerais contenant du manganèse en tant que matière première primaire. Afin d'obtenir une bonne efficacité du procédé le minerai et les concentrés de manganèse (ayant une faible teneur en fer) doivent être de type en morceaux ou sous forme de matériau fritté. Les autres matières premières qui sont requises pour le procédé de fusion sont le minerai de fer et les fondants tels que la castine et la dolomite. Le coke est utilisé comme agent réducteur et dans le cas de la production de HC FeMn dans un haut fourneau également comme source d'énergie. Pour la production du silico-manganèse, du laitier riche en ferro-manganèse et du quartz sont également nécessaires.

9.1.3.2 Techniques de prétraitement

Pour utiliser des minerais fins dans la production de ferro-manganèse une étape d'agglomération, de granulation et de frittage est utilisée. En plus des fines de minerai, le lit de fusion pour l'aggloméré incorpore des combustibles (fines de coke, fines de charbon, gaz pour l'ignition) et des fondants tels qu'une castine et de la dolomite ainsi que des fines et des poussières recyclées. Le frittage est utilisé afin d'obtenir une taille plus adéquate et de réduire le minerai naturel en une matière première de qualité métallurgique intermédiaire. Les principaux avantages du procédé d'agglomération et de frittage sont [tm 107, Ullmanns 1996] :

- Le minerai fin, qui a une application et une valeur limitées dans la fusion conventionnelle, est aggloméré et converti en un produit supérieur ;
- Des volumes de gaz réduits, et donc moins d'éruptions du four, sont obtenus quand on fait fondre l'aggloméré ;
- La disponibilité du four et les charges de fonctionnement sont accrues ;
- Meilleure porosité du lit de fusion avec une pénétration et une élimination plus aisées du gaz généré par les réactions de réduction.

9.1.3.3 Production de ferro-manganèse et de silico-manganèse

9.1.3.3.1 Ferro-manganèse à teneur élevée en carbone

Le ferro-manganèse à teneur élevée en carbone (HC FeMn) peut être produit par réduction carbothermique du minerai de manganèse en morceaux ou fritté soit dans un haut fourneau soit dans un four à arc électrique immergé triphasé.

Les hauts fourneaux qui sont utilisés pour faire fondre le HC FeMn sont similaires à ceux utilisés pour la production de la fonte, des températures supérieures sont nécessaires pour la réduction des oxydes de manganèse. La réduction des oxydes de manganèse supérieurs (MnO_2 , Mn_2O_3 et Mn_3O_4) a lieu dans la partie supérieure du haut fourneau. Le procédé de réduction des oxydes de manganèse supérieurs est exothermique et contribue à maintenir une température relativement élevée du gaz situé dans la partie supérieure. Dans certains cas un refroidissement supplémentaire du haut du four est introduit pour limiter la température. Une réduction supplémentaire des oxydes de manganèse requiert des températures supérieures à 1400 °C et a lieu dans une zone limitée au-dessus des tuyères. Ce procédé de réduction est endothermique et nécessite par conséquent une consommation élevée de coke.

Par conséquent, la production de HC FeMn dans un haut fourneau est liée à un taux de génération élevé de CO. La quantité de CO produit est bien supérieure à celle nécessaire pour chauffer le vent dans les étuves chaudes. Le gaz en excès est couramment utilisé pour produire de l'énergie électrique.

Les effluents gazeux contenant du CO doivent être dépoussiérés avant de pouvoir être utilisés pour chauffer les étuves chaudes ou brûlés pour produire de la vapeur d'eau de la génération d'électricité. Pour le dépoussiérage des effluents gazeux, une variété de différentes techniques est disponible, par exemple des filtres électrostatiques, des laveurs, des tours de lavage ou un filtre à manches. Afin de

protéger les étuves chaudes des dommages dus au matériau réfractaire et de minimiser les émissions de poussières, le système de dépoussiérage est conçu de manière à fonctionner sous 10 mg/Nm^3 de poussières. Ces techniques sont décrites en détail dans la Section 2. La production de HC FeMn dans un haut fourneau est montrée sur la figure suivante.

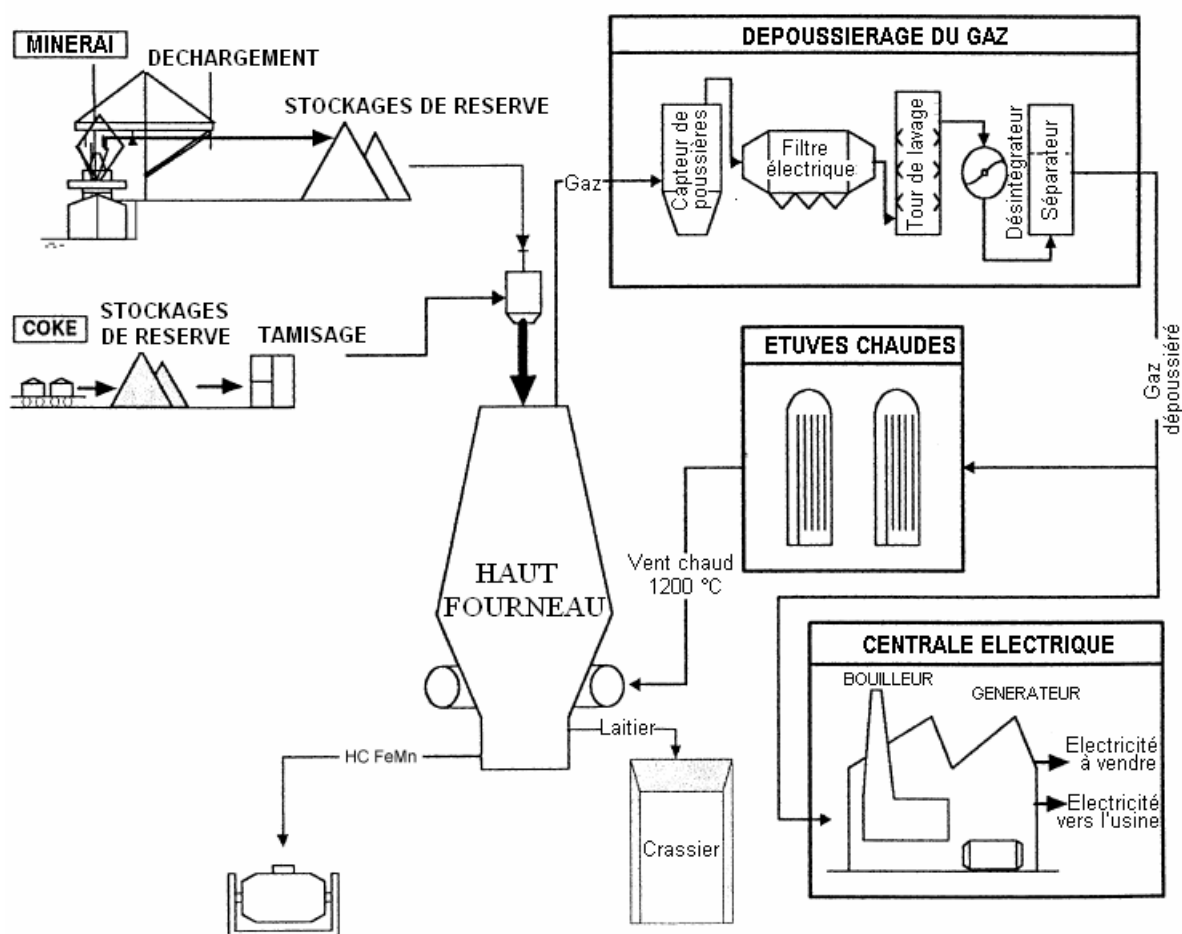


Figure 9.4 : Production de HC FeMn dans un haut fourneau [FIGURE : bouilleur → chaudière, stockages de réserve → tas de matière]

En raison de la consommation élevée de coke dans un haut fourneau la majorité des producteurs utilisent des fours à arc électrique pour produire le HC FeMn. L'avantage du four à arc électrique est dû au fait que l'énergie pour la fusion du lit de fusion est fournie par le courant électrique. Le carbone sous la forme de coke et de charbon n'est nécessaire qu'en tant qu'agent réducteur. La consommation de charbon ou de coke est par conséquent bien inférieure à celle de la quantité de coke qui est utilisée dans un haut fourneau.

Les fours à arc électrique couramment utilisés sont du type fermé, semi-fermé et ouvert, qui n'a que des conséquences nulles ou limitées sur le four lui-même mais qui affecte la composition, le débit, la récupération et le système de dépoussiérage du gaz. Le diamètre du four varie de 2 à 20 m. Les fours de plus petite taille qui sont toujours utilisés ont l'avantage d'être plus flexibles, parce qu'ils peuvent s'adapter plus facilement à différents produits.

La matière première est alimentée dans le procédé de fusion par gravité à partir des réservoirs au-dessus du four. Les tuyaux d'alimentation sont placés autour des électrodes afin d'assurer une distribution homogène de la matière première dans le four.

Le four à arc électrique pour la production de HC FeMn doit être adapté par rapport aux fours qui sont normalement utilisés pour produire les ferroalliages. Selon la pression élevée de la vapeur du ferromanganèse, le procédé de fusion nécessite une régulation minutieuse de la température parce que la charge ne doit pas être surchauffée. La pression de la vapeur ainsi qu'une résistivité relativement

faible du lit de fusion de ferro-manganèse entraîne une faible densité du courant des électrodes. En conséquence le four doit fonctionner à basse tension, ce qui requiert un diamètre plus important des électrodes pour la haute intensité qui est nécessaire pour le procédé.

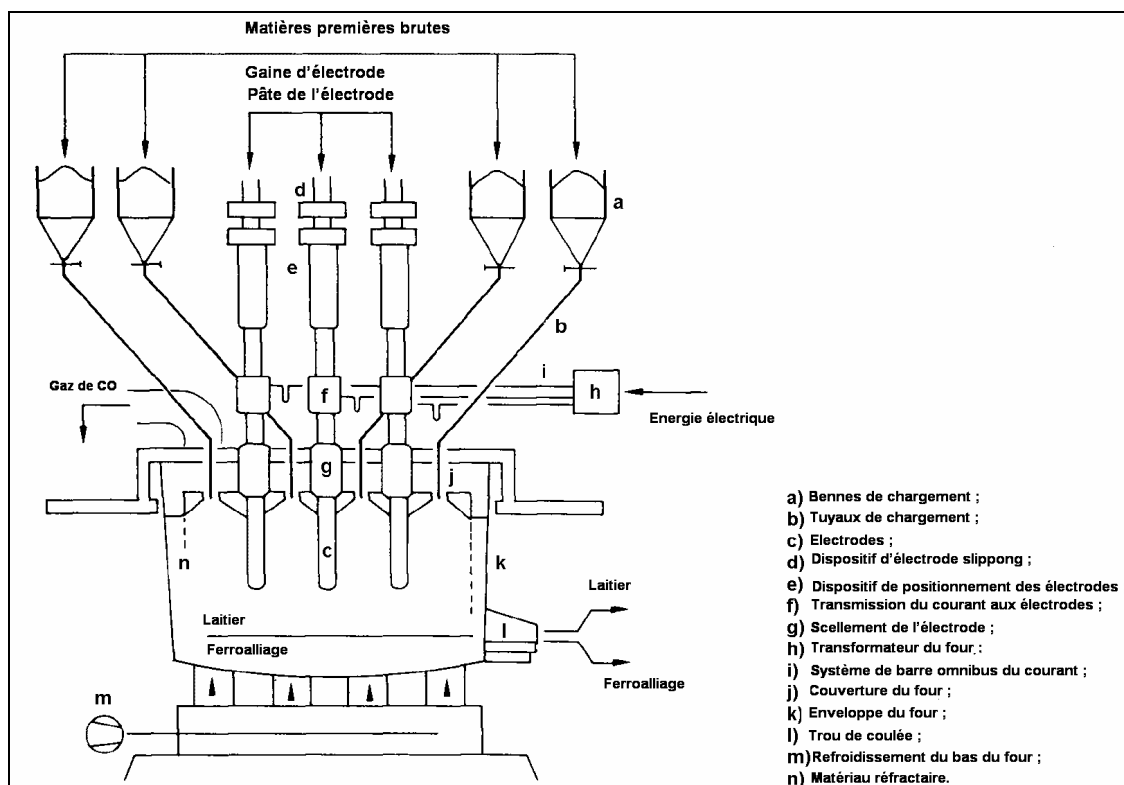


Figure 9.5 : Four à arc électrique fermé pour le ferro-manganèse utilisant des électrodes Soderberg [tm 107, Ullmanns 1996]

Les fours à arc électrique pour la production de ferro-manganèse ne fonctionnent qu'avec des électrodes Soderberg à auto-cuisson. En raison du diamètre important, l'utilisation d'électrodes pré-cuites n'est pas économique par rapport aux électrodes Soderberg.

Les électrodes Soderberg sont constituées par une gaine en acier doux ou en acier inoxydable qui est durcie à l'aide de fines internes et est remplie d'une pâte de carbone, constituée par un agrégat solide, habituellement de l'anthracite calciné, et un liant de brai de houille. Le goudron de houille devient plastique quand il est chaud et remplit le volume entier de la gaine. Quand on continue à chauffer l'électrode à l'aide du courant et de la chaleur du four, la pâte cuit et devient solide [tm 107, Ullmanns 1996]. Un four électrique à arc fermé typique pour la production de ferro-manganèse utilisant des électrodes Soderberg est montré ci-dessus.

Le métal en fusion et le laitier peuvent être recueillis continûment ou à intervalles réguliers. Le métal est coulé dans des moules garnis de ferro-manganèse concassé. Une machine de coulée peut également être utilisée pour la coulée du métal liquide. Le métal solidifié est alors concassé et tamisé pour les besoins spécifiques des clients. Le laitier est normalement obtenu sous la forme de laitier riche (avec environ 30 % de Mn) et utilisé ultérieurement pour la production de silicomanganèse.

Du fait de la consommation inférieure de coke au four électrique, les effluents gazeux contiennent moins de CO que les effluents gazeux provenant du haut fourneau. Cependant, il existe certaines installations dans lesquelles les effluents gazeux riches en CO sont utilisés pour produire de l'électricité. Les effluents gazeux riches en CO peuvent également être utilisés pour d'autres utilisations industrielles, par exemple comme matière première pour la synthèse chimique, qui dépend des conditions locales.

9.1.3.3.2 Ferro-manganèse à teneur moyenne en carbone

Pour la production du ferro-manganèse à teneur moyenne en carbone (MC FeMn) deux voies différentes peuvent être utilisées : - la réduction silicothermique du minerai de manganèse et : - la dé-carburisation du HC FeMn dans le convertisseur à oxygène. Le procédé le plus important qui est utilisé par la plupart des producteurs est le procédé d'affinage du HC FeMn.

Pour la dé-carburisation du HC FeMn, l'oxygène est soufflé dans le métal en fusion, qui est recueilli à partir du four. Le soufflage d'oxygène dans le liquide oxyde une partie du manganèse et augmente la température du bain d'environ 1350 à 1550 °C. Avec les températures croissantes le carbone présent dans le HC FeMn a également tendance à être oxydé, ce qui accroît encore la température de 1550 jusqu'à 1750 °C. L'oxydation du carbone réduit par conséquent la teneur en carbone du ferro-manganèse. Pour la production du MC FeMn le procédé de dé-carburisation se termine quand une teneur correspondante en carbone d'environ 1,3 % est atteinte. La température élevée entraîne également la vaporisation du ferro-manganèse qui quitte le procédé sous forme de fumée. La fumée peut être collectée en utilisant des hottes et renvoyée vers le four de fusion de HC FeMn.

Par contraste avec le procédé d'affinage qui utilise le HC FeMn comme matière première, la production silicothermique nécessite un minerai de manganèse et de la chaux ou un laitier de qualité élevée et du silico-manganèse. La réduction elle-même est réalisée dans un four à arc électrique triphasé, avec des électrodes faites de graphite. A la fin du cycle, l'alliage liquide et le laitier sont coulés et séparés. Le laitier est recyclé après refroidissement et concassage sous forme de matière première vers l'usine de production de silico-manganèse. Les fumées provenant des fours seront dépoussiérées dans filtre à manches. Avec la réduction silicothermique la production de MC FeMn contenant 1 % de C est possible.

Les principaux avantages du procédé d'affinage sont les coûts plus faibles de fonctionnement et d'investissement. L'avantage du procédé silicothermique est de produire du ferro-manganèse à faible teneur en carbone dans le même procédé.

9.1.3.3.3 Ferro-manganèse à faible teneur en carbone

Le ferro-manganèse à faible teneur en carbone (LC FeMn), qui contient moins de 0,75 % de C est habituellement produit par un procédé silicothermique. La production de LC FeMn par dé-carburisation du HC FeMn a également été réalisée récemment. En tant que matière première, un laitier riche est adéquat en raison du faible niveau d'impuretés. De plus, la présence des oxydes de manganèse déjà réduits dans le laitier riche est favorable au procédé. La production de LC FeMn a lieu dans un four à arc électrique très similaire à celui utilisé pour le MC FeMn, produit par un procédé silicothermique. Le laitier obtenu est utilisé pour la production du silico-manganèse comme matière première.

9.1.3.3.4 Silico-manganèse

Le silico-manganèse est requis comme élément d'alliage dans l'industrie de l'acier ainsi que comme matière première pour produire le MC et LC FeMn. La production de silico-manganèse est basée sur le minerai ou l'aggloméré de manganèse et le quartz comme matière première. A la place du minerai de manganèse, un laitier riche en ferro-manganèse tel que celui produit sous la forme de laitier riche dans une production de HC, MC et LC FeMn peut être utilisé comme source de manganèse. Le silico-manganèse n'est de nos jours produit que dans les fours à arc électrique immergé, qui peuvent être du type fermé, semi-fermé ou ouvert. Les fours sont identiques ou très similaires à ceux utilisés pour la production du HC ferro-manganèse et un four fonctionne souvent avec des campagnes alternées de chaque alliage. En fonction de la composition du mélange de la charge, du silico-manganèse ayant une teneur en silicium de 15 à 35 % peut être produit. Pour un fonctionnement convenable du four et une réduction efficace du silicium il est nécessaire de plonger les électrodes plus profondément dans le lit de fusion afin d'atteindre la température élevée nécessaire au procédé.

9.1.4 Ferro-nickel

9.1.4.1 Matières premières

Le ferro-nickel (FeNi) ainsi que le ferro-chrome est l'agent d'alliage majeur dans la production de l'acier inoxydable. Le minerai de latérite est la matière première principale. Le minerai de latérite est caractérisé par une teneur en nickel relativement faible (de 1,2 à 3 %) et une teneur en humidité élevée (jusqu'à 45 %) conjointement avec de l'eau liée chimiquement sous la forme d'hydroxyde [tm 107, Ullmanns 1996]. En plus du minerai de latérite, du coke ou du charbon représente la seconde matière première qui est nécessaire dans la production du ferro-nickel. Le coke ou le charbon est utilisé comme agent réducteur parce que la production de ferro-nickel se fait par un procédé carbothermique. Le FeNi peut également être produit à partir de matières premières secondaires, telles que les catalyseurs usagés et la boue de l'industrie de la galvanisation.

9.1.4.2 Production de ferro-nickel à partir de matière première primaire

La production de ferro-nickel à partir de matière première primaire est réalisée exclusivement par le procédé utilisant un four rotatif-four électrique. Ainsi que mentionné ci-dessus la matière première transporte une quantité importante d'eau, et donc la première étape du procédé est une opération de séchage. Le séchage a normalement lieu dans un sécheur rotatif chauffé directement où la teneur en humidité peut être réduite d'environ 45 à 15 %. Il faut éviter un séchage supplémentaire en dessous de 15 % afin de maintenir la génération de poussières dans le procédé de calcination et de fusion subséquent aussi bas que possible.

L'étape suivante du procédé est l'homogénéisation, où les différents minerais sont mélangés avec du charbon et des poussières pelletisées, qui sont recyclées à partir du procédé principal. La charge sèche en mélange est alors introduite dans un four rotatif. Le four rotatif est utilisé pour déshydrater le minerai par calcination et pour pré-réduire le nickel et l'oxyde de fer. Le procédé a lieu à environ 900 - 1000 °C. Le procédé de calcination et de pré-réduction fournit une charge du four qui contient environ 40 % du nickel sous forme de métal et le contenu en fer sous la forme d'oxydes de fer(II).

La calcine pré-réduite chaude peut être introduite directement dans le four de fusion ou par des conteneurs isolés. Les conteneurs peuvent être utilisés pour deux raisons, tout d'abord pour conserver la chaleur et ensuite pour ajouter du coke ou du charbon requis pour une réduction complète avant qu'ils soient déchargés dans le four électrique, où une fusion et une réduction finale se produisent [tm 113, M. T. Antony et D. S. Flett 1997].

Actuellement, la fusion du ferro-nickel n'a lieu que dans les fours à arc électrique. Dans le four électrique l'opération de fusion réductrice se produit par l'action combinée des électrodes de carbone et de l'agent réducteur carboné solide ajouté. La température de fusion du laitier dans le procédé de fusion du ferro-nickel est fortement dépendante de la teneur en FeO. Donc, le mode de fonctionnement du four change si la température de fusion du laitier est supérieure ou inférieure à la température de fusion du métal. Si la température de fusion du laitier est supérieure au point de fusion du métal, le four peut fonctionner facilement avec un bain couvert. Dans ce cas, les extrémités d'électrode ne sont pas immergées dans le laitier et la réduction finale des oxydes de nickel et de fer prend principalement place dans la charge chaude qui recouvre la couche de laitier. Si la température de fusion du laitier est inférieure à la température de fusion du métal, le four est plus difficile à exploiter. Afin d'atteindre la température de fusion du métal les électrodes doivent plonger profondément dans la couche de laitier. La température la plus élevée du bain sera alors à proximité des extrémités d'électrode où la fusion a lieu à l'interface laitier-métaux. Ces conditions de fonctionnement entraînent un taux de génération élevé de CO gazeux, ce qui requiert une surface de bain ouverte autour des électrodes.

Pour réduire une teneur élevée en oxydes de nickel, le lit de fusion contient couramment une proportion de carbone en excès. Ceux-ci augmentent également la quantité de fer qui sera réduite et la teneur finale en carbone du ferro-nickel brut. Pour réduire la teneur en fer et en carbone, une étape d'affinage supplémentaire est nécessaire. Pour éviter un affinage supplémentaire, plusieurs

améliorations du procédé ont été apportées. Par exemple dans le « procédé Ferro-nickel Ugine » aucun agent réducteur n'est ajouté. Le four électrique produit un minerai liquide, qui est réduit en ferro-nickel en utilisant du ferro-silicium dans un four-poche supplémentaire. Dans le « procédé Ferro-nickel Falcondo » un four à cuve est utilisé à la place d'un four rotatif. Dans le four à cuve un minerai briqueté est réduit avec un gaz réducteur (naphta à faible teneur en soufre). Le four électrique ultérieur n'est alors utilisé que pour faire fondre le métal et pour le séparer du laitier.

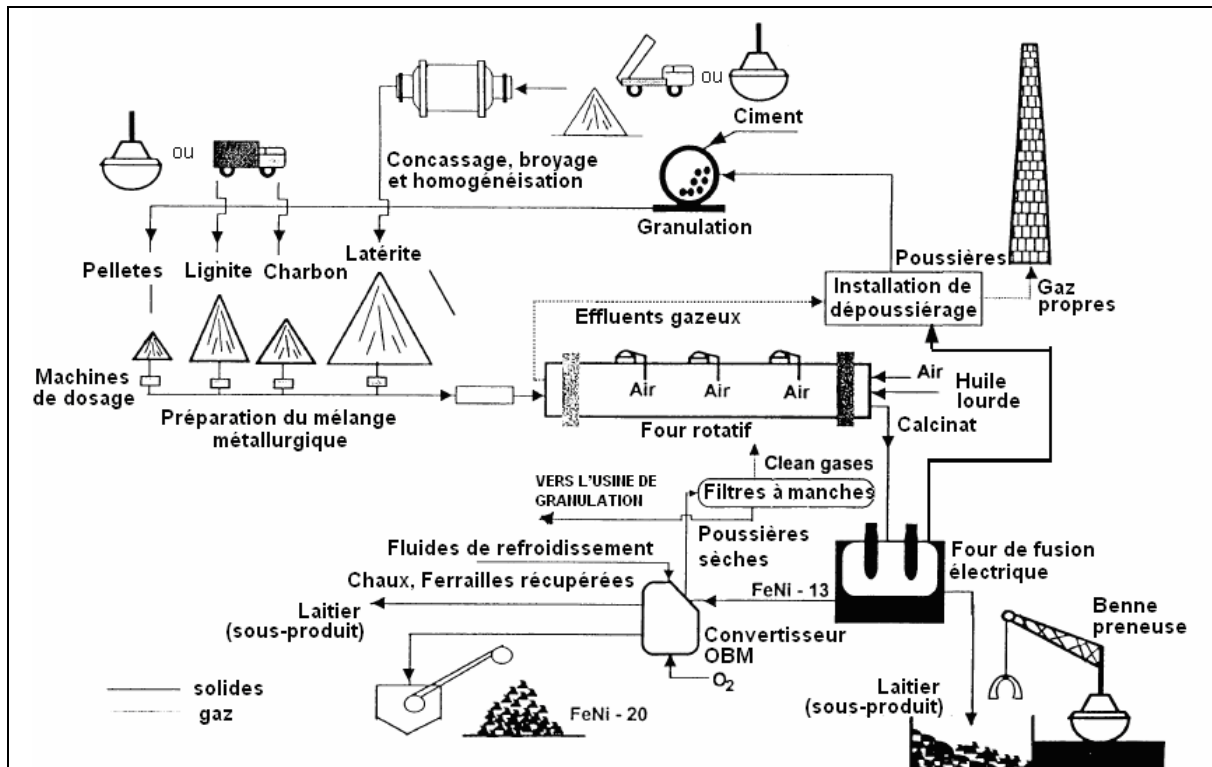


Figure 9.6 : Procédé utilisant un four rotatif-four à arc électrique pour la production de ferro-nickel

Le ferro-nickel produit par le procédé conventionnel nécessite un affinage supplémentaire. A côté de la réduction du fer et du carbone, les impuretés telles que le soufre, le silicium et le phosphore doivent être enlevées. Pour l'affinage du ferro-nickel une variété d'équipements est disponible, par exemple une poche à secousse, un four à induction, un four à arc électrique et des convertisseurs à oxygène. Le ferro-nickel purifié est coulé sous forme de lingots ou granulé sous l'action de l'eau.

Les effluents gazeux contenant des poussières provenant du four rotatif, du four de fusion à arc électrique et de l'étape d'affinage sont traités par un système de dépollution approprié. Le contenu en poussières peut être pelletisé et recyclé dans le poste de mélange de la matière première. Un schéma de production de ferro-nickel est présenté sur la figure ci-dessus.

9.1.4.3 Production de ferro-nickel à partir de matière première secondaire

Le FeNi peut également être produit à partir des résidus contenant du nickel utilisés comme matière première secondaire. Ces résidus, principalement les catalyseurs usagés provenant de la production de graisse, sont brûlés dans un four rotatif afin de concentrer la partie Ni sous forme d'oxyde de Ni dans les poussières de gaz. Les effluents gazeux contenant des poussières sont traités dans un filtre à membrane, où les poussières collectées sont utilisées comme matière première pour le procédé de fusion. La production de FeNi a alors lieu dans un four à arc électrique immergé. L'alliage liquide est recueilli, granulé dans de l'eau et conditionné dans des fûts ou des big bags pour la fourniture.

9.1.5 Ferro-vanadium

L'ajout de ferro-vanadium à de l'acier en fusion augmente la résistance à la traction et la haute tenue thermique de l'acier au carbone même si de petites quantités sont ajoutées. L'acier allié au vanadium est donc utilisé pour les outils à coupe rapide.

Le ferro-vanadium (FeV) peut être produit par une réduction carbothermique ou métallothermique des oxydes de vanadium, aidée par la présence de fer. Parce que le carbone est utilisé dans une réduction carbothermique, la teneur finale en carbone de l'alliage produit est élevée. La production de ferro-vanadium en utilisant du carbone comme agent réducteur n'est donc possible que s'il n'y a aucune exigence de faible teneur en carbone. Actuellement, le ferro-vanadium est habituellement produit par une réduction aluminothermique.

Au besoin, un broyage, un calibrage et un séchage peuvent être réalisés avant de charger le mélange dans le procédé de fusion. La réduction aluminothermique de l'oxyde de vanadium est un procédé autoentretenu qui peut être réalisé dans un creuset ayant un garnissage réfractaire. Les cuves de réaction utilisées pour ce procédé peuvent être du type suivant :

- Creuset à garnissage réfractaire utilisant un garnissage non réutilisable ;
- Anneau à garnissage réfractaire placé sur un puits contenant du sable ;
- Un four électrique où de l'énergie supplémentaire peut être fournie soit pour augmenter la chaleur de réaction soit pour permettre de réaliser des opérations d'affinage du laitier. Le four à arc électrique est également utilisé, parce que les fines de FeV générées par concassage du FeV peuvent être refondues.

L'opération de fusion a lieu dans un procédé discontinu, où la totalité de la charge est transférée dans la cuve de réaction et est enflammée. Après ignition le temps de combustion pour une taille habituelle de lot d'environ 1 t de ferro-vanadium ne prend que quelques minutes. En raison de la courte durée de la réaction, le contenu en oxydes de vanadium dans le laitier et en aluminium dans le métal peuvent ne pas atteindre l'équilibre. La production dans un four électrique a donc l'avantage de garder la charge à l'état liquide jusqu'à ce que la réaction soit complètement finie. Les fumées provenant du procédé sont aspirées et traitées en utilisant des filtres à manches ou des laveurs humides.

En fonction du type de procédé, on peut laisser le laitier et le métal refroidir dans le creuset, ou le laitier et le métal peuvent être recueillis dans des poches ou dans des lits pour permettre la séparation du laitier et du métal et pour provoquer un refroidissement rapide. La vidange du creuset requiert des hottes à extraction et des vitesses d'extraction suffisantes pour évacuer les fumées et les poussières s'échappant pendant la vidange. Le laitier issu du procédé aluminothermique peut être utilisé comme futurs garnissages de creusets ou concassé et classé pour être utilisé dans d'autres industries. Le bloc de métal peut être refroidi à l'air ou refroidi à l'eau, ce qui facilite le concassage ultérieur. Toutes les étapes de concassage et de tamisage ont des unités d'extraction des poussières dédiées, à partir desquelles les poussières sont renvoyées vers le procédé de production au moment le plus approprié pour assurer un recyclage continu des produits récupérés.

9.1.6 Grillage de la molybdénite et la production de ferro-molybdène

9.1.6.1 Grillage de la molybdénite

Le trioxyde de molybdène de qualité technique (MoO_3) est la matière première principale dans la production du ferro-molybdène ainsi que le composé de départ pour un certain nombre d'autres produits contenant du molybdène tels que le dimolybdate d'ammonium, le molybdate de sodium et le métal de molybdène [tm 107, Ullmanns 1996]. Le grillage tel qu'il est montré schématiquement ci-dessous réalise la conversion de la molybdénite concentrée (minerai de sulfure de molybdène) en trioxyde de molybdène de qualité technique pour l'industrie métallurgique ou chimique.

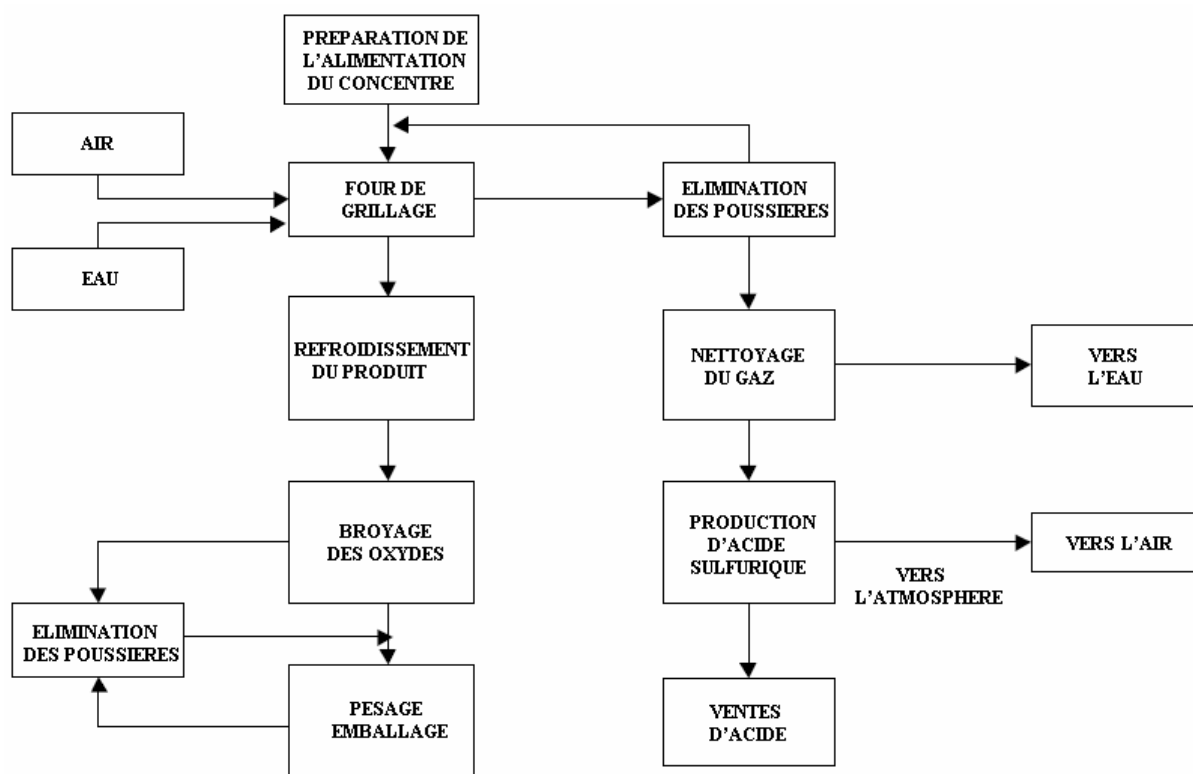


Figure 9.7 : Diagramme des opérations du grillage de la molybdénite

Le procédé de grillage du minerai de molybdénite a lieu dans un four de grillage à soles multiples de modèle Nichols Herreschoff ou Lurgi. Le four du type Nichols Herreschoff est décrit en détail dans la Section 2. Les fours de grillage à soles multiples sont constitués par un certain nombre de soles agencées verticalement. Dans la partie supérieure du four, de l'énergie supplémentaire est ajoutée sous la forme de gaz naturel afin de brûler les huiles de flottation et d'évaporer l'eau.

Le procédé de grillage lui-même est exothermique et ne nécessite pas d'énergie supplémentaire sauf si les pertes de chaleur associées à l'air de refroidissement de la colonne de l'axe central, la radiation provenant de l'enveloppe du four de grillage et les émissions d'oxyde chaud provenant du four de grillage sont importantes. Au moyen de ventilateurs de tirage, le four de grillage fonctionne à une pression négative par rapport à la pression atmosphérique. Ceci sert à réguler l'entrée d'air ambiant pour l'oxydation et le refroidissement et prévient toute émission de dioxyde de soufre dans l'environnement. Le débit d'air, la vitesse d'écoulement et parfois l'injection par pulvérisation d'eau régulent les vitesses et les températures de réaction. L'oxyde de molybdène produit est évacué du four de grillage puis refroidi, concassé sous forme d'une poudre fine, échantillonné et analysé avant pesage et emballage.

Les effluents issus du procédé contiennent de grandes quantités de dioxyde de soufre et de poussières (jusqu'à 15 % du concentré dans la charge). La partie pulvérulente peut être éliminée du flux gazeux en utilisant des filtres électrostatiques à température élevée et recyclée dans le concentré chargé dans le four de grillage. Le dioxyde de soufre est normalement converti en acide sulfurique dans une unité de production d'acide sulfurique adjacente. La conversion de dioxyde de soufre en acide sulfurique est décrite en détail dans la Section 2. En plus de la génération de poussières et de dioxyde de soufre, des métaux de terres rares tels que le rhénium et le sélénium qui entrent dans le four avec la matière première quittent le procédé sous forme d'oxydes de métaux vaporisés. Ces éléments peuvent être éliminés du flux gazeux par épuration par voie humide avec une usine de traitement associée pour la solution de lavage. Le sélénium et le rhénium sont alors récupérés à partir des échangeurs d'ions utilisés dans l'usine de traitement des eaux usées par des compagnies spécialisées.

Dans la transformation à façon des concentrés de molybdène, les lots de matière première peuvent avoir des différences élevées en teneur en Mo (de 46 % à 58 %) et en d'autres composés. Le grillage des lots ayant différentes qualités influence le traitement des effluents gazeux.

9.1.6.2 Production de ferro-molybdène

Le ferro-molybdène peut être produit soit par la réduction carbothermique soit par la réduction métallothermique du trioxyde de molybdène. Du fait de considérations pratiques telles que l'équipement de fusion utilisé pour le procédé et les coûts de fabrication réduits, la production métallothermique de ferro-molybdène est bien plus importante que la réduction carbothermique. Cependant la réduction carbo-thermique va être brièvement décrite pour fournir une vue d'ensemble complète de la production de ferro-molybdène.

9.1.6.2.1 Matières premières

La production de ferro-molybdène est basée sur le trioxyde de molybdène de qualité technique (MoO_3) en tant que matière première. En plus de la matière première principale, du trioxyde de molybdène, de l'oxyde de fer ou de la calamine, des poinçonnages ou des tournures d'acier sont nécessaires pour produire le ferro-molybdène. La chaux et le spath fluor sont couramment utilisés comme fondants et du charbon de bois, du silicium (ferro-silicium) ou de l'aluminium, en fonction de la voie de production, sont nécessaires en tant qu'agent réducteur.

9.1.6.2.2 Production carbothermique de ferro-molybdène

Pour la réduction carbothermique un four à arc électrique du type monophasé ou triphasé peut être utilisé. En comparaison avec le four à arc électrique triphasé le système monophasé a l'avantage de générer une densité d'énergie supérieure à l'intérieur du four. Ceci est dû au fait que le four est équipé d'une électrode de sole en carbone. Le procédé se présente comme un procédé en discontinu qui démarre normalement par re-fusion du laitier provenant d'une opération de fusion précédente. Le trioxyde de molybdène est alors ajouté au procédé sous forme de briquettes. Le laitier peut être recueilli à partir du four et le métal enlevé alors qu'il est toujours chaud puis refroidi avec de l'eau. L'inconvénient du procédé carbothermique est le fait que le laitier contient des quantités relativement élevées de molybdène. Le laitier doit donc être refondu dans un procédé séparé dans lequel un alliage intermédiaire à teneur élevée en carbone est produit, qui peut être utilisé comme matériau de recyclage pour démarrer le procédé principal.

9.1.6.2.3 Production métallothermique de ferro-molybdène

Ainsi que mentionné ci-dessus, de nos jours la réduction métallothermique est le procédé le plus courant qui est utilisé pour la production du ferro-molybdène. En raison de l'énergie libre de Gibbs de l'aluminium plus élevée que celle du silicium, le ferro-silicium est l'agent réducteur préféré afin d'assurer des conditions de procédé sûres. Cependant, pour obtenir le bilan thermique requis pour la réaction, il est nécessaire d'utiliser une petite quantité d'aluminium.

Le procédé métallothermique requiert de la matière première sèche pour le procédé. La calamine qui arrive sèche est stockée dans une soute recouverte avant le tamisage et le séchage afin de prévenir les fuites fugitives. Les déchets d'acier qui arrivent également en vrac sont déchargés et conditionnés dans des conteneurs avant d'être stockés. Les réactions de fusion efficaces et douces requièrent un mélange de matière première adéquatement classée, et ceci est d'importance particulière en ce qui concerne les oxydes et les agents réducteurs. Du spath fluor est parfois ajouté pour améliorer la séparation du laitier et du métal. Pour obtenir la matière première de dimensions convenables, il est nécessaire de broyer et de tamiser le ferro-silicium. Il faut réaliser toutes les opérations de prétraitement telles que le broyage, le transfert par tamisage et le mélange en utilisant des mesures de régulation des poussières.

L'opération de fusion peut être effectuée d'un certain nombre de manières, les plus courantes sont [tm, 128 EuroAlliage 1998] :

L'utilisation de longs puits contenant du sable où des cylindres d'acier à garnissage réfractaire sont placés pour former des creusets qui contiennent la réaction métallothermique. La réaction elle-même peut être réalisée de différentes manières. La réaction ainsi appelée réaction alimentée par le haut a

lieu quand la totalité de la charge est placée dans le creuset puis enflammée à partir du haut. En variante seule une partie de la charge peut être placée dans le creuset et enflammée, le reste de la charge peut alors être ajouté au fur et à mesure que la réaction se déroule (réactions alimentées).

L'utilisation de creusets à garnissage réfractaire qui sont placés à l'intérieur d'une chambre qui peut être fermée. Comme dans la description précédente, la réaction peut alors être réalisée en plaçant la totalité de la charge dans le creuset et en l'enflammant, ou en ajoutant seulement une partie de la charge, en initiant la réaction puis en ajoutant progressivement le reste de la charge au fur et à mesure que la réaction se déroule.

Les poussières et les fumées générées par le procédé doivent être extraites, récupérées et recyclées afin d'assurer un rendement global du molybdène de 97 à 99 %. Les poussières et les émanations collectées sont aspirées vers un filtre à manches à décolmatage par soufflage d'air par contre-pression. Les manches de filtre peuvent être fabriqués à partir de tissus spéciaux sur lesquels on applique parfois un garnissage supplémentaire pour supporter les températures élevées. Les poussières du filtre à manches peuvent alors être renvoyées directement dans le procédé de fusion principal. Une bonne gestion est également nécessaire pour recycler tous les éclaboussures, balayures etc. afin d'obtenir un rendement global du molybdène efficace.

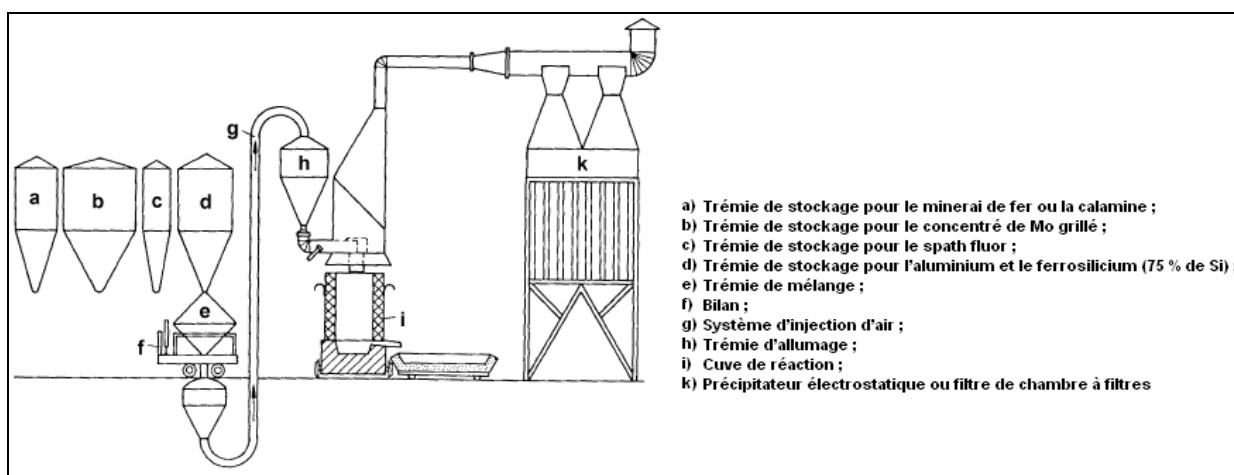


Figure 9.8 : Agencement métallothermique

[tm 107, Ullmanns 1996]

Le procédé de fusion produit un bloc d'alliage (masse) qui pèse entre 2,5 et 3 tonnes. Après que le laitier est séparé, le bloc de métal chaud doit être refroidi. Ceci peut être réalisé soit par refroidissement naturel dans l'air, soit par trempage dans l'eau. Le bloc de métal refroidi est alors cassé en morceaux qui peuvent être alimentés dans une usine de concassage et de tamisage intégrée pour produire la grande plage de taille des produits utilisée sur toute la planète.

Un diagramme du procédé qui montre les étapes principales de la production métallothermique de ferro-molybdène est présenté sur la figure suivante.

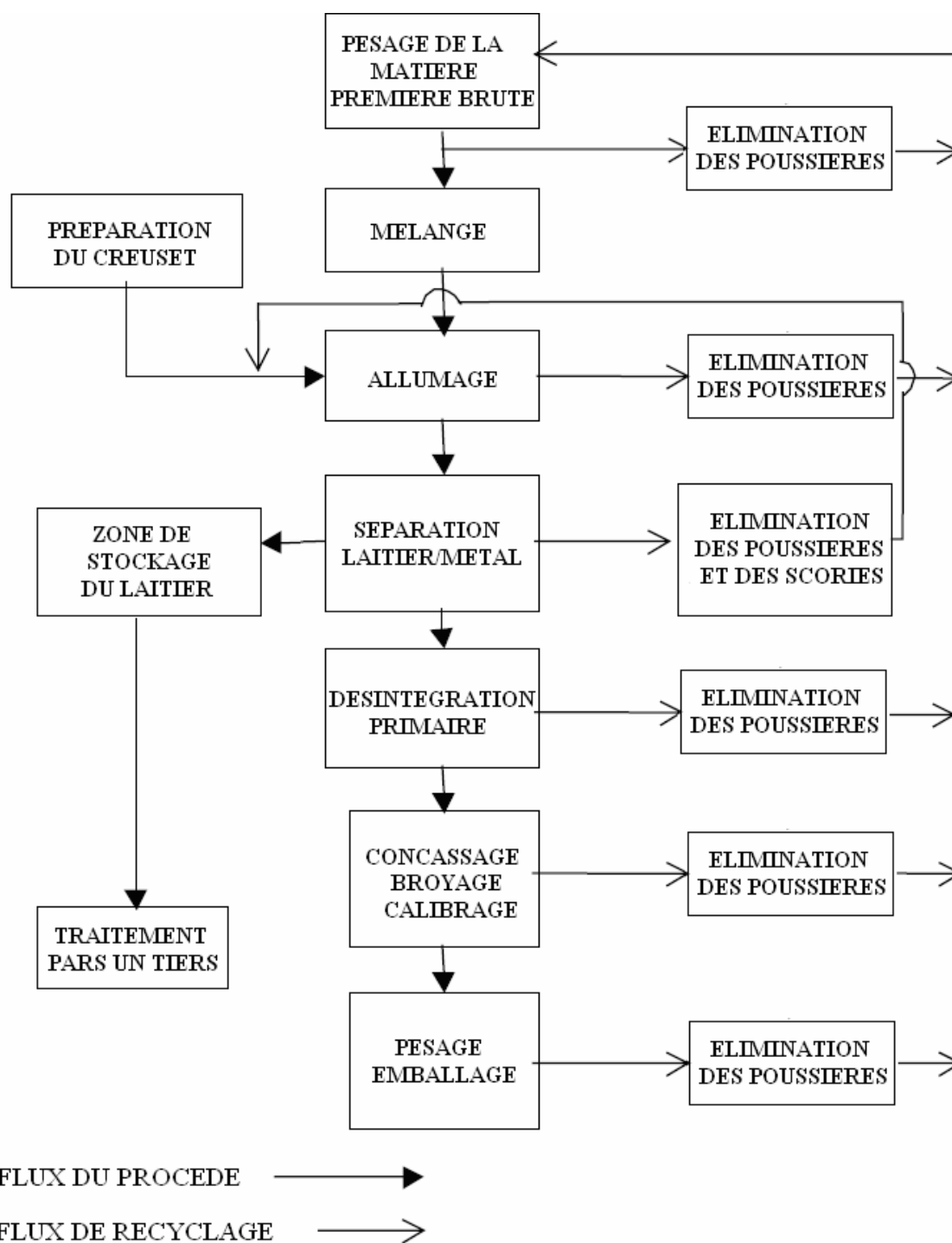


Figure 9.9 : Production de ferro-molybdène par une réduction métallothermique [FIGURE : il manque la partie haute de la figure]

9.1.7 Ferro-tungstène

Le ferro-tungstène ainsi que du TMB (tungsten melting base) qui est préparé à partir de matière première secondaire est principalement utilisé pour améliorer les propriétés de l'acier. Le tungstène en tant qu'élément d'alliage forme des carbures stables et augmente donc la résistance à chaud et la résistance à l'usure de l'acier. Un tel acier (acier à coupe rapide) est nécessaire pour produire les outils à coupe rapide qui peuvent être utilisés jusqu'à des températures d'environ 600 °C. De plus, ce tungstène améliorera un certain nombre d'autres propriétés telles que la dureté, la limite d'élasticité et la résistance finale à la traction [tm 107, Ullmanns 1996].

9.1.7.1 Production de ferro-tungstène et base de fusion du tungstène

9.1.7.1.1 Ferro-tungstène

Le ferro-tungstène peut être produit à partir de différentes matières premières contenant des oxydes de tungstène, par exemple de la wolframite, de la scheelite et de la hübnerite. La réduction de ces minéraux peut être effectuée par réduction soit carbo- soit métallothermique ainsi que par une combinaison des deux.

Le procédé carbothermique qui est connu sous le nom de procédé de fusion des blocs solides a lieu dans un four à arc électrique. En raison de la température élevée de fusion du ferro-tungstène, l'alliage produit ne peut pas être recueilli à partir du four. Après que la fusion a démarré, le métal s'accumule au fond du four. Quand la quantité de métal a atteint le poids souhaité, le four est éteint. Le lingot de métal peut alors être récupéré à partir du four après que le garnissage réfractaire a été enlevé. Le métal est alors concassé et tamisé. Si plusieurs fours sont utilisés en parallèle, la production peut alors avoir lieu sous la forme d'un procédé quasi-continu. Les effluents gazeux provenant du four sont traités par un système de purification du gaz afin de minimiser l'impact environnemental et de récupérer la quantité de trioxyde de tungstène dans les poussières de gaz.

Une combinaison des procédés carbo- et métallothermiques utilisant à la fois du carbone et du ferro-silicium comme agent réducteur est utilisée pour produire un ferroalliage ayant une teneur élevée en tungstène. Le procédé est réalisé en trois étapes successives dans un four à arc électrique. Dans la première étape, un laitier de trioxyde de tungstène est produit qui est ensuite réduit avec du ferro-silicium dans l'étape suivante. La troisième étape, l'étape finale, est nécessaire pour augmenter la teneur en tungstène par affinage du métal à faible teneur en tungstène à partir de la seconde étape en ajoutant des concentrés de tungstène.

Le procédé métallothermique est moins valide d'un point de vue économique parce que le procédé requiert une matière première très pure et donc coûteuse. Afin de maintenir le procédé autoentretenu, un mélange de silicium et d'aluminium est normalement utilisé comme agent réducteur. Le métal peut être récupéré à partir de la cuve du four après refroidissement et élimination des garnissages du four. Du fait de ses inconvénients économiques, la production métallothermique de ferro-tungstène n'est de nos jours adéquate que s'il y a des exigences spéciales de la part des clients.

9.1.7.1.1.1 Base de fusion du tungstène (BFT)

La base de fusion du tungstène (BFT) est un alliage de tungstène qui est produit à partir de matière première secondaire. Les sources principales sont différents types de déchets de métal de tungstène. La production de BFT n'est qu'un procédé de re-fusion et d'alliage, qui peut avoir lieu dans un four à arc électrique. Le fait que de plus en plus de déchets de tungstène soient disponibles sur le marché accroît l'importance du procédé de re-fusion qui requiert moins d'énergie que le procédé de fusion primaire.

9.1.8 Ferro-titane

Le ferro-titane peut être produit à partir de matière première soit primaire soit secondaire et est utilisé pour une variété de différentes applications. En tant qu'élément d'alliage il augmente la limite d'élasticité et réduit la tendance à la fissuration. Dans la production de l'acier inoxydable ayant une teneur élevée en chrome et en nickel, du ferro-titane est utilisé pour la lier le soufre [tm 107, Ullmanns 1996].

Pour la production du ferro-titane, les minéraux contenant de l'oxyde de titane en tant que matière première primaire, tels que l'ilménite, sont utilisés. La réduction se produit couramment par le procédé métallothermique parce que la réduction carbothermique produit un alliage qui contient trop de carbone et est donc inintéressant comme élément d'alliage dans l'industrie de l'acier. La production se présente comme un procédé en discontinu dans un creuset à garnissage réfractaire ou dans un four électrique en fonction de la variation du procédé.

Au cours des récentes années la disponibilité des déchets de titane sur le marché a augmenté et la production de ferro-titane à partir de la matière première secondaire est donc plus importante. La production de ferro-titane est réalisée en faisant fondre des déchets ferreux et du titane dans un four de fusion à induction électrique. Le procédé d'alliage est un procédé ne générant pas de laitier.

Les unités ferreuses sont achetées pour une spécification sous la forme d'aciers doux solides. Les déchets de titane sont livrés sur site dans des camions à conteneur. La charge comprend des déchets de coulée de métal en morceaux, des produits travaillés et des tournures issus des procédés d'usinage. Après réception, les matériaux sont vérifiés pour s'assurer qu'ils ne sont pas contaminés par des matériaux radioactifs. On réduit la taille des grands morceaux de déchets par oxycoupage. Les copeaux sont déchetés en utilisant un pulvérisateur de copeaux puis alimentés dans une centrifugeuse pour éliminer l'huile et l'humidité.

Les copeaux de titane sont dégraissés dans un sécheur rotatif, où les gaz transportant de l'huile sont amenés à travers un cyclone pour éliminer les poussières. Ces gaz passent alors à travers une post-combustion. Les gaz de combustion/fumées sont soit remis en circulation dans le sécheur soit conduits vers un second cyclone. Après être passé à travers le cyclone, un sorbant (bicarbonate de sodium) est introduit pour neutraliser le flux gazeux. Enfin, le gaz passe à travers un filtre céramique avant d'être rejeté dans l'atmosphère via une cheminée.

Les charges du four sont calculées en se basant sur l'analyse des matières premières. Les matériaux sont pesés dans des plateaux de balance et alimentés dans un four de fusion à induction électrique. Un système de déversoir est utilisé pour alimenter les matériaux pendant l'opération de fusion. Quand la fusion est terminée, le métal en fusion est recueilli dans un moule à lingot et un échantillon de coulée est prélevé pour être soumis à une analyse. Après refroidissement, le lingot est transféré à d'autres opérations telles qu'une désagrégation, un concassage et un broyage pour donner la taille requise du produit. La figure suivante présente un diagramme pour la production du ferro-titane.

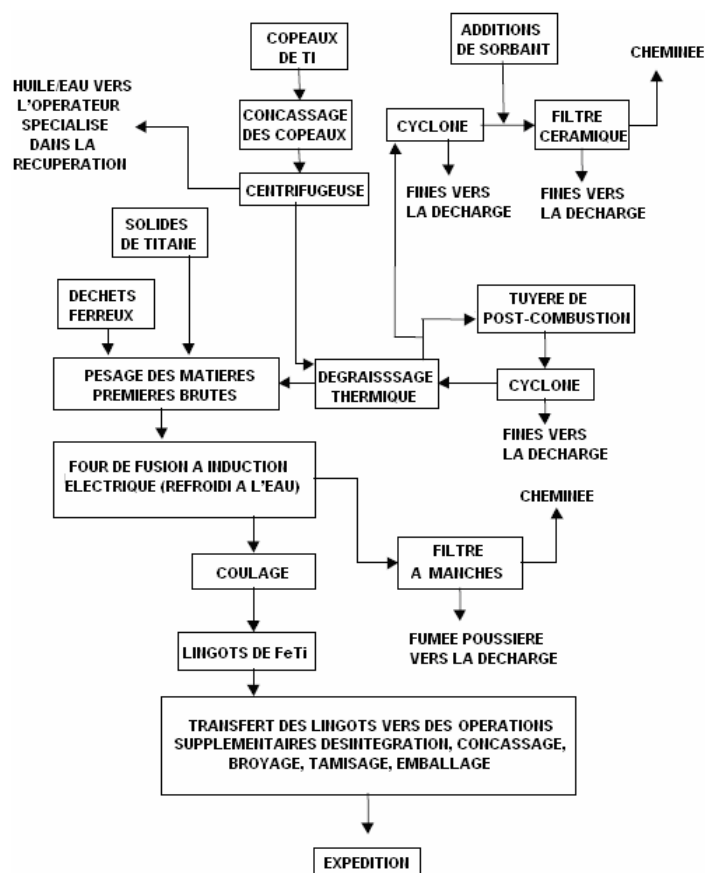


Figure 9.10 : Schéma représentant la production du ferro-titane

9.1.9 Ferro-bore

Le ferro-bore est principalement utilisé comme additif dans la fabrication de l'acier pour augmenter la trempabilité, la résistance au fluage et la malléabilité à chaud parce que l'acier allié au bore est résistant à l'oxydation jusqu'à 900 °C. La matière première pour produire du ferro-bore est constituée par les oxydes boriques et l'acide borique. Le carbone (charbon de bois), l'aluminium ou le magnésium sont utilisés comme agent réducteur. La production peut même être effectuée par la réduction carbothermique ou métallothermique.

Les matières premières arrivent dans une variété de formes emballées, par exemple, des fûts, des conteneurs de matériaux en vrac intermédiaires flexibles, des palettes, des plateformes de manutention et des balles enrobées de polyéthylène. Les matériaux sont pesés dans des bennes fermées au niveau d'un poste de pesage spécialement conçu. Les sacs de matériaux en vrac sont déchargés à partir d'une charpente incorporant une membrane de scellement, qui prévient les émissions fugitives. Un système local d'extraction des fumées dirigé vers une unité filtrante poursuit l'élimination des poussières restantes.

La réduction carbothermique a lieu dans des fours à arc électrique immergé monophasé ou triphasé en fonction de la spécification du procédé. Il existe certaines variations du procédé carbothermique. On peut réduire les oxydes boriques et les oxydes de fer simultanément avec du charbon de bois dans un four à arc électrique immergé, où un autre procédé est basé sur la poudre de fer, de l'acide borique et le charbon de bois dans un four à arc électrique de type Heroult. Le schéma suivant montre le procédé pour la production de ferro-bore et d'alliage de bore.

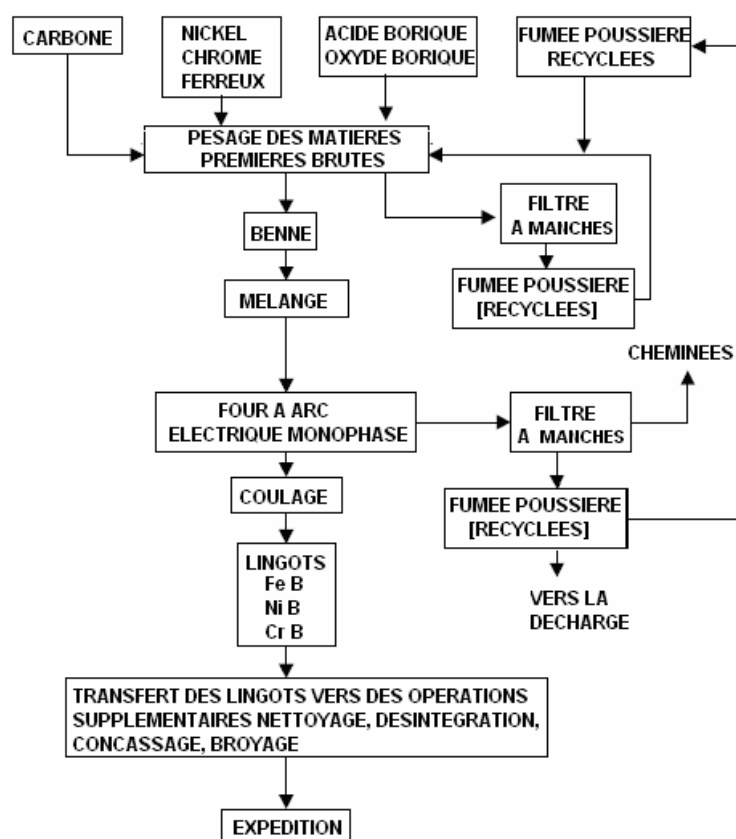


Figure 9.11 : Procédé pour la production de ferro-bore et d'alliage de bore

Le procédé métallothermique utilise de l'aluminium conjointement avec une petite portion de magnésium comme agent réducteur. Cette réaction est hautement exothermique et ne nécessite que quelques minutes pour avoir lieu dans un creuset à garnissage réfractaire. La réaction peut être déclenchée avec la totalité de la charge ou un mélange de départ. Après que la réaction est finie, l'alliage de métal qui se forme au fond du four peut être enlevé mécaniquement. Il peut alors être concassé et tamisé afin de produire la taille souhaitée des particules.

9.1.10 Ferro-niobium

Le ferro-niobium en tant qu'agent d'alliage améliore la résistance à la corrosion et la soudabilité de l'acier et protège spécialement l'acier au chrome-nickel inoxydable de la corrosion inter-cristalline. Les matières premières pour produire le ferro-niobium sont le minerai et les concentrés contenant du niobium et l'oxyde de fer. La réduction se produit sous la forme d'un procédé alumino-thermique. La réaction a normalement lieu dans un creuset à garnissage réfractaire, où la totalité de la charge peut être enflammée ou juste une partie de celle-ci qui peut servir de mélange de départ.

9.1.11 Production de ferroalliages à partir de matière première secondaire

En raison de la grande quantité de matières premières secondaires disponibles, spécialement les oxydes de métaux provenant de la production d'acier inoxydable, la récupération des ferroalliages, principalement du ferro-chrome, est devenue une partie importante de l'industrie des ferroalliages. Le développement des divers procédés a succédé au besoin croissant des fabricants d'acier inoxydable de traiter leurs déchets afin de récupérer le contenu en métaux de valeur et pour limiter ou prévenir le déversement des déchets.

Le marché total du traitement des déchets de ce type de résidus provenant de l'industrie de l'acier inoxydable en Europe est estimé à environ 150 000 tonnes par an, correspondant à environ 75 000 tonnes d'alliages. Les deux tiers de ce marché sont actuellement traités en seconde fusion pour être convertis en métal. Le marché est fortement lié au développement de l'industrie de l'acier inoxydable et montre des tendances positives pour les années à venir.

9.1.11.1 Matière première et préparation de la matière première

Les matières premières typiques pour la production de ferroalliages secondaires sont les résidus suivants générés principalement au sein de la production de l'acier inoxydable :

- Poussières sous filtre de four à arc électrique (EAF),
- Poussières sous filtre de convertisseur,
- Tous types de fines de calamine,
- Poussières de grenailage,
- Poussières de broyage.

Les caractéristiques chimiques et physiques de ces matières premières varient de façon extrême. Cependant elles peuvent être décrites comme suit :

Élément	Teneur
Cr ₂ O ₃	10 - 25 %
NiO	2 - 15 %
MoO ₃	0 - 5 %
Fe ₂ O ₃	30 - 65 %
CaO	1 - 30 %
Al ₂ O ₃	0,5 - 4 %
SiO ₂	1 - 15 %
MgO	1 - 5 %
ZnO	1 - 20 %
PbO	0,2 - 1 %
CdO	0,001 – 0,05 %
CuO	0,1 - 3 %
S	0,2 – 0,5 %
Cl	0,1 - 1 %
F	0 - 3 %
Hg	0 - 15 ppm

Tableau 9.2 : Quantités typiques des oxydes de métaux dans la matière première secondaire

La composition en agrégat des résidus est principalement oxydée avec une fraction métallique variable plus petite, principalement à partir des opérations de traitement de surface telles que le broyage, le grenailage etc. La granulométrie de la matière première est typiquement entre 1,0 et 3,0 μm . Les agglomérations et les matières premières compactées se trouvent habituellement dans les livraisons.

La teneur en humidité dans la matière première peut varier entre 0 et 35 % en raison des différentes étapes de traitement du gaz ou autres étapes de séparation installées au niveau des aciéries. Ceci requiert dans une certaine mesure des équipements de manutention et de convoyage flexibles ainsi qu'un équipement de séchage.

En raison des diverses sources et qualités des résidus, la rentabilité de l'activité requiert une teneur minimale des éléments d'alliage : Ni, Cr et, s'il peut être mis en valeur, Mo. Les résidus provenant de la fabrication de l'acier inoxydable austénitique (18 - 8 ou plus) offrent une teneur appropriée de typiquement > 3 % de Ni, > 12 % de Cr, tandis qu'une proportion importante de résidus provenant de la production d'acier inoxydable ferritique (17 % de Cr) est toujours jetée pour des raisons de coût du procédé.

La gamme de produits des différentes aciéries influence principalement la composition des déchets, par la technologie employée et par les matières premières alimentées. Deux aspects majeurs de cette relation sont par exemple la quantité de chaux dans les poussières sous filtre et sa teneur en zinc. La teneur en chaux est principalement influencée par les différentes opérations dans l'aciérie elle-même et la qualité de la chaux. La qualité de la chaux, à savoir sa proportion de fines, influence la quantité totale de chaux présente dans les poussières sous filtre. La teneur en zinc dans les poussières sous filtre et autres métaux lourds, par exemple Pb, Cd, Hg, est principalement dépendante de la qualité de la charge des déchets pour le four à arc électrique. S'il y a une proportion élevée de déchets contenant des déchets galvanisés dans la charge, la totalité du zinc est collectée dans les poussières sous filtre.

Des dioxines peuvent être présentes dans les poussières sous filtre du four. La présence et la quantité des dioxines sont dépendantes de la qualité de déchets provenant des unités de production d'acier inoxydable et de la manière dont les effluents gazeux y sont traités. Les impuretés de plastique (composés de chlore) favorisent la formation de dioxines dans les poussières sous filtre.

La quantité de matière première nécessaire pour produire le ferroalliage varie également considérablement en raison des différentes teneurs en métaux dans la charge. La récupération produit typiquement de 400 à 600 kg par métal par tonne de matière première sèche.

9.1.11.2 Prétraitement

En raison de la présence de divers éléments grossiers non souhaités dans la matière première, par exemple de masques filtrants, morceaux de déchets, réfractaires, il est nécessaire de tamiser les matières premières. La matière première peut être livrée dans des big bags ou en vrac. Les big bags sont vidés dans une enceinte qui est équipée d'équipements de dépoussiérage distincts. La matière première sèche est alors convoyée vers un tamis vibrant où les éléments étrangers sont éliminés sur un tamis > 10 mm. Après cette étape le matériau est convoyé avec un convoyeur à godets vers un groupe de silos qui est utilisé comme silo tampon avant l'étape de mélange.

Dans le cas où l'on utilise le four à arc immergé, la chaux libre contenue dans les matières premières est neutralisée avec de l'eau dans un mélangeur spécifique avant l'agglomération par briquetage. Après plusieurs jours de durcissement à couvert, les briquettes sont mélangées à d'autres ingrédients de charge et alimentées dans le four.

9.1.11.2.1 Mélange et séchage (Procédé Plasmadust uniquement)

Après tamisage, les agents laitiers sont analysés dans les matières premières afin de déterminer la quantité de sable ou de chaux qui doit être ajoutée pour équilibrer la basicité du laitier. La quantité nécessaire d'agents laitiers est ajoutée - principalement du sable siliceux - conjointement avec environ

de 1 à 10 % d'eau dans un mélangeur discontinu hautement turbulent afin d'obtenir suffisamment de micro granulés non agglomérants. La consommation de sable siliceux est dépendante de la matière première, respectivement de basicité, cependant elle est typiquement dans la plage de 0 à 100 kg/tonne de matière première sèche.

L'objectif du séchage du matériau est d'obtenir une charge sèche homogène qui peut être envoyée pneumatiquement vers le bâtiment où se trouve le four. Le sécheur rotatif indirect utilisé à cette fin est chauffé avec un gaz de procédé riche en CO. Le sécheur est équipé d'un brûleur combiné au gaz et au fuel. Après séchage, le matériau quitte le sécheur à moins de 1000 °C. Le matériau est de nouveau tamisé avant d'être convoyé vers une soute intermédiaire.

Une unité filtrante est utilisée, dans laquelle les émissions de mercure sont surveillées en continu en ligne. Avant d'entrer dans le sécheur, une petite quantité de Na_2S est ajoutée au matériau, si nécessaire, pour former des composés de mercure stables afin de prévenir l'évaporation du mercure.

9.1.11.3 Procédé utilisant un four à arc immergé

Le procédé de récupération qui utilise un four à arc électrique immergé est très similaire à la production de ferro-chrome dans un four à arc électrique. Il existe une installation aux États-Unis qui emploie un four à soles rotatives pour la pré-réduction, suivie d'une fusion dans un four à arc immergé.

Les effluents gazeux du four sont filtrés à sec dans un filtre à manches conventionnel. Le gaz est dilué par l'air ambiant dans la partie supérieure du four ouvert où la combustion du CO est complète. La composition typique est de 90 % d'air (de 18 à 20 % d'excès d' O_2), 7 % de CO_2 , et 3 % d' H_2O .

Le traitement des effluents gazeux est effectué dans un filtre à manches à deux étages. Après refroidissement sous 200 °C, les poussières du four sont séparées dans la première étape et collectées pour le recyclage ou une transformation supplémentaire. Dans la seconde étape, des granules d'absorbant (charbon actif ou coke de lignite) sont injectés. Les métaux volatils, notamment le mercure et dans une moindre mesure le cadmium et le plomb, sont chimiosorbés sur la surface du carbone. L'absorbant piège également les composés chlorés y compris la dioxine. Cette seconde étape a lieu à une température inférieure à 130 °C. Le même filtre à manches collecte les fumées issues du procédé de vidange.

Une quantité limitée d'eau est injectée et vaporisée dans les effluents gazeux pour la régulation de la température. L'eau du procédé et l'eau de refroidissement sont en circuit fermé, la consommation nette étant libérée sous forme de vapeur d'eau dans les gaz d'évacuation du four et par les réfrigérants par évaporation.

Le procédé ne produit donc pas d'effluents liquides. Environ 60 % de la consommation d'eau est assuré par la collecte de l'eau de pluie tombant sur le site industriel (sol et bâtiments).

Le laitier liquide est séparé du métal par gravité. L'utilisation de multiples cascades permet une séparation presque complète. La faible basicité du laitier (de 0,7 à 0,8) assure la formation de silicates stables, qui sont non lixiviants. Avant l'expédition, des tests portant sur la composition chimique et la lixiviation sont réalisés pour qualifier chaque lot de production. Le laitier est utilisé dans diverses applications relatives à la construction après le redimensionnement approprié.

L'alliage est coulé dans des moules en fer. Les gueuses pèsent de 2 à 4 tonnes chacune. Le laitier non agglomérant est collecté dans une cuve à ciel ouvert où il se solidifie. Après la solidification du métal, les lingots sont cassés en plusieurs grands morceaux avec un marteau hydraulique afin de faciliter l'expédition et la re-fusion. En raison de sa teneur en nickel, le métal est relativement dur (pas fragile) contrairement à la plupart des ferroalliages. Il ne requiert aucune transformation supplémentaire et est prêt pour un transport en vrac par camion ou véhicules de chemin de fer.

9.1.11.4 Procédé Plasmadust

Après les étapes de prétraitement, la matière première secondaire telle qu'elle est également utilisée pour le procédé utilisant un arc immergé est pneumatiquement transportée au moyen d'un système sous vide fermé depuis le bâtiment de préparation de la matière première jusqu'au bâtiment où se trouve le four.

La fusion a lieu dans un four à cuve comprenant une enveloppe refroidie à l'eau de 12 m de haut avec un diamètre interne d'environ 2,5 m. Le four est équipé par exemple de trois générateurs à plasma fournissant un effet plasma chauffant installé de 18 MW. La cuve est remplie de coke en morceaux, qui se comporte comme un agent réducteur. Les générateurs à plasma placés symétriquement autour de la partie inférieure du four fournissent l'énergie requise pour les réactions endothermiques. Le gaz de plasma - gaz de procédé remis en circulation - est amené dans le four à travers des tuyères de cuivre refroidies à l'eau. La charge est injectée dans le four par des tuyères et mélangée avec le gaz de plasma (environ de 4 000 à 5 000 °C) dans là où la réaction a lieu.

Le coke est chargé à partir du haut du four à intervalles réguliers. La colonne de coke se comporte comme un agent réducteur et un filtre pour le gaz étant évacué du four. En raison de la distribution de chaleur égale dans le four et de sa hauteur, un rendement élevé peut être obtenu en termes de réduction des éléments de valeur Ni, Cr, Mo, Fe et un entraînement comparativement faible dans l'étape de traitement du gaz. Avant que la vidange soit atteinte, la matière première est injectée dans la cuve. A intervalles réguliers le four est vidangé en perçant un trou en bas du four de façon similaire à la procédure sur les hauts fourneaux. Le métal chaud est coulé à une température d'environ 1 400 °C dans des lits de coulée garnis de matériau réfractaire, dans des gueuses de 3 à 4 tonnes chacune. Ceci correspond à un rendement de métal de 40 à 60 %. L'alliage est enrichi en carbone (de 4 à 6 %) et peut être concassé en morceaux d'environ 500 à 800 kg, conformément aux exigences des utilisateurs finaux des diverses aciéries.

Le système de traitement du gaz est équipé d'un laveur venturi à trois étages combiné à un électrofiltre humide qui est situé après le troisième étage du système venturi. L'électrofiltre humide épure davantage le gaz du procédé. Après ces étapes de filtration, les effluents gazeux sont encore débarrassés du mercure dans un filtre de sélénium. Ici, la vapeur de mercure est liée au sélénure de mercure. Les effluents gazeux propres sont soit utilisés pour chauffer le sécheur, soit fournis à un réseau de chauffage urbain soit brûlés dans une flamme. Environ 50 % de cette énergie pour le réseau de chauffage urbain sont produits par échange direct de chaleur de l'eau de refroidissement provenant du four, les 50 % restants sont produits dans un générateur d'eau surchauffée. Environ 50 % du gaz du procédé sont remis en circulation dans les générateurs à plasma à travers un compresseur et utilisés comme gaz pour le transfert de chaleur. Depuis peu, les émissions de mercure dans le flux gazeux après la torche sont également mesurées en continu en ligne.

Le laitier est séparé du métal par gravité et écrémage du laitier à partir du métal. Le laitier inerte coule dans un puits où il est régulièrement extrait et concassé en même temps. Ensuite, le laitier est séparé de façon externe des morceaux de métaux. Par expérience, la basicité est d'environ 1,0 (CaO , SiO_2) de sorte que ce type de produit de laitier peut être vendu sous la forme d'un matériau non lixiviant utile pour la construction de routes. Des tests de lixiviation à grande échelle et à long terme ont été effectués, dans lesquels le laitier issu de la production a été exposé à de l'eau de pluie pendant 1,5 ans. Ces tests ont prouvé que le laitier était un matériau adéquat pour les projets de construction de routes en raison de sa lixivabilité très faible des métaux et de ses caractéristiques similaires à celles des roches contenant des minéraux naturels.

9.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

La fabrication des ferroalliages est en général un procédé consommateur d'énergie, parce que la fusion a lieu à des températures élevées. La production des ferroalliages est donc liée à une consommation relativement élevée de matières premières telles que le minerai, les concentrés et les fondants ainsi que d'agents réducteurs et de combustibles tels que le coke ou le charbon et d'énergie électrique. L'impact environnemental sur l'air, l'eau et les sols peut être classé comme suit.

- **Consommation de matière première et d'énergie**
 - Consommation de matière première et d'énergie
- **Émissions dans l'air**
 - Émissions de poussières et de fumée
 - Autres émissions dans l'air (SO₂, NO_x, CO, CO₂, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), composés organiques volatils, dioxines et métaux lourds.
 - Emissions de bruit et de vibrations
- **Résidus solides, déchets et sous-produits**
 - Poussières, fumée et boue
 - Laitier
- **Émissions d'eaux usées**
 - Eaux usées provenant des systèmes d'épuration des fumées par voie humide
 - Eaux usées issues de la granulation du laitier et des métaux
 - Extraction à partir des cycles de l'eau de refroidissement
- **Récupération de l'énergie**
 - Récupération de l'énergie en termes de l'utilisation des effluents gazeux riches en CO provenant de fours fermés.
 - Récupération de l'énergie provenant de la chaleur résiduelle des fours semi-fermés

9.2.1 Consommation de matière première et d'énergie

Les données disponibles sur la consommation de matière première et d'énergie pour la production de ferroalliages sont présentées en termes de facteurs d'entrée spécifiques ramenés à une tonne de produit, dans les tableaux suivants. Bien que la consommation de matières premières et d'énergie dépende de la qualité des minéraux utilisés.

Pour éviter les fausses différences entre les variantes du procédé, il est important de ne présenter que la consommation d'énergie brute. Les sources d'énergie participant au procédé de production sont constituées par l'énergie électrique et l'énergie chimique latente dans la matière carbonée. Un kg de carbone a un contenu énergétique brut potentiel lors de la conversion en CO₂ d'environ 8,8 kWh, ou d'environ 7,7 kWh/kg de coke. Si ces chiffres sont utilisés, la consommation brute d'énergie pour la production des ferroalliages courants peut être calculée tel que montré dans les tableaux suivants. La quantité brute de CO₂ émise sera directement proportionnelle à la quantité de coke consommée dans le procédé.

Matière première	HC FeCr				MC FeCr	LC FeCr
Chromite	2 400 - 3 000	2 300 - 2 400	n.d.	n.d.	n.d.	1 600

kg/t	(N 1)	(N 2)				
Agent réducteur kg/t	550 - 700 (N 1)	500 - 550 (N 2)	600 (N 3)	n.d.	n.d.	675 (FeSiCr)
Fondants kg/t	100 - 400 (N 1)	200 - 300 (N 2)	n.d.	n.d.	n.d.	1 100
Autres kg/t	Électrode 8 - 25 Produits de deuxième fusion 0 -300	Electrode 7 - 10	n.d.	n.d.	n.d.	Sable < 100 kg Si < 40 kg Électrode 10 kg Acide borique 3 k
Énergie électrique kWh/t	3 800 - 4 500 (N 1)	3 100 - 3 500 (N 2)	2 600 - 3 100 (N 3)	4 500 (N 4)	n.d.	3 400 (N 5)
Énergie potentielle en utilisant du coke kWh/t	4 235 - 5 390 (N 1)	3 850 - 4 235 (N 2)	4 620 (N 3)	n.d.	n.d.	n.p.
Intrant énergétique total kWh/t	8 035 - 9 890 (N 1)	6 950 - 7 735 (N 2)	7 220 - 7 720 (N 3)	n.d.	n.d.	3 400
Notes : (N 1) Données relatives à la consommation d'un four à arc immergé ouvert conventionnel, minerai en morceaux et fin sans procédés d'agglomération, de préchauffage et/ou de pré-réduction. (N 2) Données relatives à la consommation en utilisant des granulés préchauffés comme matière première et aucun produit de deuxième fusion. (N 3) Consommation en utilisant des granulés pré-réduits comme matière première. Dans ce cas la consommation d'énergie est dépendante de la qualité de la métallisation. (N 4) Four C.C. sans procédé de pré-réduction. (N 5) La consommation d'énergie présentée fait référence à la conversion du FeSiCr en LCFerCr. Si la production du produit intermédiaire - FeSiCr - est incluse, l'énergie électrique est de 8 050 à 9 500, l'énergie potentielle en utilisant du coke de 5 750 à 6 400 et l'intrant énergétique total de 13 800 à 15 900 kWh/t de LCFerCr. La consommation d'électricité et d'agent réducteur mentionnée ci-dessus représente la totalité du procédé de production. La consommation d'énergie électrique est d'environ 95 % de la consommation totale. La partie principale des 5 % restants est l'énergie électrique nécessaire au traitement des effluents gazeux. n.d. = non disponible n.p. = non pertinent						

Tableau 9.3 : Consommation brute de matière première et d'énergie lors de la production du ferro-chrome

La consommation d'énergie utilisée pour le frittage du minerai de chromite dépend du type du four de frittage qui est utilisé et des caractéristiques des différents concentrés de chromite. La consommation du poussier de coke sera généralement dans la plage de 60 à 90 kg/t d'aggloméré. Avec une consommation d'aggloméré entre 2 et 2,5 tonnes par tonne de ferro-chrome, cela représente de 120 à 225 kg de poussier par tonne de ferro-chrome. La consommation d'énergie externe d'un four de frittage à convoyeur en acier varie entre 200 et 400 kWh/t de granulés. L'énergie provient du poussier de coke et du CO issu de la fusion. La consommation du poussier de coke est de 20 à 40 kg/t de granulés et la proportion du CO en tant qu'énergie externe est d'environ 20 à 40 %. L'énergie externe pour le séchage du coke dans un four à cuve est d'environ 200 kWh/tonne de coke, ce qui représente 100 kWh/t de FeCr.

La consommation de pâte d'électrode Soderberg varie entre 7 et 20 kg/t de FeCr, la consommation la plus faible est obtenue quand on utilise une charge préchauffée ou pré-réduite et agglomérée.

L'eau est utilisée dans la production du ferro-chrome à la fois comme eau de procédé et comme eau de refroidissement. L'eau de procédé est utilisée pour le lavage des fumées et la granulation du laitier. Si le traitement de l'eau de procédé se fait en circuit fermé, de 5 à 15 m³ d'eau/t de ferrochrome sont normalement utilisés. Aux fins du refroidissement, de 5 à 15 m³ d'eau/t de ferro-chrome sont également utilisés.

Les déchets oxydés provenant des aciéries, les poussières et la calamine sont récupérés en utilisant les procédés adoptés de la production du ferro-chrome à teneur élevée en carbone. La consommation d'énergie pour la réduction métallurgique est montrée dans le tableau suivant pour les teneurs typiques en métaux récupérables. Deux types de fours sont utilisés, les fours à arc immergé conventionnels et les fours à cuve à plasma C.C.

	Four à arc électrique immergé conventionnel	Procédé de plasmadust
Résidus kg/t	1 650 - 2 500	1 650 - 2 500
Agent réducteur kg/t	400 - 500	400 - 500
Électricité kWh/t	3 000 - 3 400	2 800 - 3 800
Contenus métalliques % (entrée)		
Ni		
Cr	3 - 15	3 - 15
Mo	15 - 25	15 - 25
C	1 - 5	1 - 5
Si	4 - 6	4 - 6
Fer	0,5 - 8	0,1 - 1
	Reste	Reste
Eau m³/t	1,0 - 1,5	2,8 - 3,2
Récupération de l'alliage (sortie)		
Cr	> 80 %	90 - 95 %
Ni	> 90 %	90 - 98 %
Mo	> 90 %	90 - 98 %
Fe	> 90 %	90 - 98 %

Tableau 9.4 : Données relatives à la consommation pour la récupération des ferroalliages à partir des résidus d'aciérie, exprimées comme des facteurs d'intrants spécifiques rapportés à une tonne de métal récupéré

La consommation d'énergie et de matière première pour la production du ferro-silicium et du métal de silicium est présentée en termes de facteurs d'intrants spécifiques sous la forme d'un exemple dans le tableau suivant, parce que, en raison de considérations spécifiques à l'usine et aux produits, d'autres combinaisons de matières premières sont également courantes. La quantité d'énergie électrique qui est donnée dans le tableau correspond à un four à arc électrique immergé ouvert ou fermé couramment utilisé sans récupération de l'énergie.

	Ferro-silicium (75 % de Si)	Métal de silicium	CaSi
Quartzite kg/t	1 800	2 600	1 500
Agent réducteur kg/t	850	1 150 – 1 500	925
Électrode kg/t	50	100 (N 2)	120
Granulés de minerai de fer kg/t	350	n.p.	n.p.
Pierre à chaux kg/t	n.p.	n.p.	900
Copeaux kg/t	0 - 400	1 000 – 2 000	n.p.
Énergie électrique kWh/t	8 500	10 800 - 12 000 (N 1)	9 500
Énergie potentielle en faisant l'hypothèse que du coke ou du charbon est utilisé kWh/t	6 545 (coke/charbon)	10 120 - 13 200 (charbon)	7 122 (coke)
Intrant énergétique total kWh/t	15 045	20 920 - 25 200	16 622
Notes : n.d. = non disponible n.p. = non pertinent (N 1) La consommation d'énergie idéale pour la production de métal de silicium est de 10 100 kWh/t (chaleur de la réaction = 8 kWh/t, perte de chaleur avec le métal = 0,9 kWh/t et perte de chaleur dans les effluents gazeux = 1,2 kWh/t). (N 2) Certains producteurs de silicium utilisent une électrode combinée Soderberg/graphite. L'objectif est d'utiliser la technologie Soderberg, mais de réduire les impuretés de fer causées par la gaine d'électrode			

Tableau 9.5 : Consommation de matière première et d'énergie lors de la production de ferro-silicium, de silicium et de CaSi en tant que facteurs d'intrants spécifiques

De travaux récents ont abouti à un nouveau type d'électrode utilisant une combinaison de la technologie Soderberg et d'un cœur en graphite, pour permettre au système de produire un métal de silicium. L'objectif est de réduire les impuretés de fer causées par la gaine de l'électrode.

Les facteurs d'intrants spécifiques pour la production des différentes sortes de ferro-manganèse ainsi que pour le silico-manganèse et le procédé de frittage des minerais et concentrés de manganèse sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Source	Aggloméré	HC FeMn		MC, LC FeMn (silicothermique)	SiMn (SiMn standard et LC)	Notes
		HF	Four à arc électrique			
Minerai kg/t	1 000 - 1 300	2 000	1 900 - 2 100	1 600 - 2 000	500 - 1 700	(N 1)
Coke kg/t	100	1 100 - 1 450	410 - 450	200 - 300	400 - 600	
Charbon kg/t	100	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	
Gaz m ³ /t	150 - 200		n.p.		n.p.	
Électrode kg/t	n.p.	n.p.	8 - 20	6 - 8	20 - 30	
Eau m ³ /t	12 - 18	eau de refroidissement	1,5-40 (N3) eau de refroidissement	eau de refroidissement	1,5 - 40 (N 3) eau de refroidis- sement	(N 2)
Autres kg/t	n.p.	n.p.	n.p.	Fondants 800 - 1 000 SiMn 700 - 1 000	Laitier de FeMn 400 - 2 500	
Électricité kWh/t	n.p.	n.p.	2 200 - 3 000	1 600 - 2 000	3 800 - 6 000	
Energie potentielle en utilisant du coke kWh/t		8 470 - 11 165	3 157 - 3 465	1 540 - 2 310	3 080 - 4 620	
Intrant énergétique total kWh/t		8 470 - 11 165	5 357 - 6 465	3 140 - 4 310	6 880 - 10 620	
Notes : (N 1) La consommation de matières premières contient normalement des matériaux recyclés tels que des poussières et des boues provenant du système de dépollution (N 2) La consommation d'eau est dépendante de l'équipement de traitement de l'eau et varie de 20 à 40 m ³ /t en circuit ouvert et de 1,5 à 5 m ³ /t en circuit fermé (N 3) La consommation d'eau est associée au dépoussiérage humide HF = Haut fourneau n.d. = non disponible n.p. = non pertinent						

Tableau 9.6 : Données de consommation pour la production d'aggloméré de minerai de manganèse, de ferro-manganèse et de silico-manganèse en tant que facteurs d'entrée spécifiques

Les informations disponibles relatives à la consommation de matière première et d'énergie pour la production de divers ferroalliages spéciaux sont présentées dans le tableau suivant.

	Alliages de FeNi	FeV	FeMo (N 3)	FeTi	FeB
Oxydes de métaux kg/t	n.d.	1 100 - 2 000 (N 1)	n.d. (N 3)	n.d.	n.d.
Énergie électrique kWh/t	1 500	2 200 - 2 800	160 - 405	770	6 000 - 11 000
Gaz m ³ /t	120	n.p.	148 - 155 MJ/t	55	75
Eau m ³ /t	6,9	(N 2)	n.p.	n.m.	0,3
Chaux vive kg/t	n.d.	n.p.	20 - 180	n.p.	n.p.
Spath fluor kg/t	n.p.	n.p.	0 - 30	n.p.	n.p.
Aluminium kg/t		800 - 1 000	36 - 70	n.p.	n.p.
Fer métallique kg/t	n.d.	100 - 150	23 - 210	(N 4)	n.d.
Calamine kg/t	n.p.	n.p.	250 - 550	n.p.	n.d.
Autres kg/t	n.d.	n.d.	620 - 700 (FeSi)		n.d.
Notes : (N 1) Les données présentées contiennent la quantité de V ₂ O ₃ et de V ₂ O ₅ (N 2) La consommation d'eau est très spécifique à un site donné et donc non représentative (N 3) Les données relatives à la consommation pour la production du FeMo sont basées sur une tonne de molybdène. (N 4) La quantité de fer métallique dépend de l'alliage étant préparé, par exemple le FeTi 70 % contient 700 kg de Ti et 300 kg de fer par t d'alliage ; tandis que le FeTi 40 % contient 400 kg de Ti et 600 kg de fer par t d'alliage. n.d. = non disponible n.p. = non pertinent dans ce procédé de production n.m. = non mesuré					

Tableau 9.7 : Données de consommation pour la production de ferroalliage spécial en tant que facteurs d'entrée spécifiques

Le procédé de grillage des concentrés de molybdénite est un procédé autothermique puisque la réaction d'oxydation est enflammée. L'énergie externe sous forme d'électricité n'est donc nécessaire qu'au fonctionnement mécanique des fours de grillage à soles multiples. Le gaz naturel est utilisé pour sécher les concentrés et pour enflammer toute huile de flottation et pour élever la température jusqu'au point où les réactions exothermiques sont enflammées.

9.2.2 Émissions

9.2.2.1 Émissions dans l'air

9.2.2.1.1 Émissions de poussières et de fumées

Du fait de la matière première qui est nécessaire et aux opérations unitaires utilisées, par exemple concassage, séchage, frittage, fusion, coulée et manutention des produits, la source provoquant l'impact environnemental le plus important est représentée par les émissions de poussières et de fumée. La figure suivante montre les points d'émission potentiels pour les émissions de poussières et de fumée provenant d'une usine de production de ferroalliages.

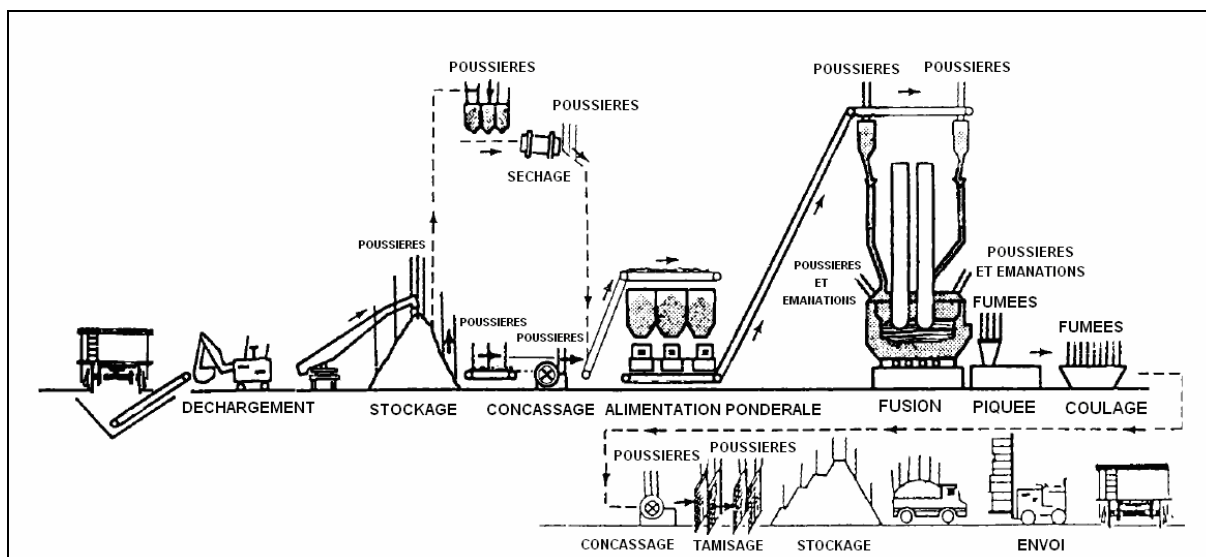


Figure 9.12 : Schéma représentant la production de ferroalliages et indiquant les points potentiels d'émissions atmosphériques [tm 35, ECE 1995]

Le déchargement et le stockage de la matière première peuvent générer des poussières quand le matériau tombe d'un convoyeur à l'autre. Des poussières peuvent également être produites si le convoyeur va trop vite (à savoir plus de 3,5 m/s). Si un chariot élévateur frontal est utilisé, on observe la formation de poussières sur toute la distance du transport.

Les poussières qui sont produites par le procédé de fusion sont collectées par des hottes ou, dans le cas d'un four fermé, directement par le scellement du four, et elles sont transférées vers une unité de dépollution où elles sont dépoussiérées (par exemple par un filtre à manches ou un laveur humide). Le lavage est utilisé pour les fours fermés.

Les effluents gazeux issus de la vidange sont constitués par des poussières et des fumées provoquées par la lance à oxygène, des poussières issues du perçage, des fumées provenant de la vaporisation du laitier si un pistolet à piquée est utilisé et des fumées provenant de toutes les surfaces exposées de métal et de laitier. Ces fumées qui proviennent de la vidange seront principalement des oxydes métalliques impliqués dans le procédé de fusion.

Les tableaux suivants présentent les données disponibles relatives aux émissions pour les émissions de poussières provenant de la production de différents ferroalliages.

Source	HC FeCr		MC FeCr		LC FeCr	
	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³
Manutention de la matière première	0,01 0,02	f (N 2)	n.d.	f (N 2)		f (N 2)
Séchage	0,002 (Coke)	1 – 50	n.d.	n.d.	0,082 (Minerai)	5
Concassage	0,002		n.d.	n.d.	0,003	3
Granulation/frittage	0,01 - 0,02 /t de granulés	1 – 15	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Frittage	0,2 - 0,5	1 - 30 (N 4)	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Poste de dosage	0,01 - 0,02	1 - 30 (N 4)	n.d.	n.d.	0,024	5
Préchauffage	0,001 - 0,005	1 - 15 (N 4)	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Four de fusion	0,02 - 0,1 (N 1)	1 - 100 (N 4,5,6)	n.d.	n.d.	0,101	8
vidange	(N 3)	5 - 12 (N 4)	n.d.	n.d.	(N 7)	(N 7)
Coulée	(N 3)	5 - 12 (N 3)	n.d.	n.d.	0,2 - 0,4 (N 4)	3 - 15 (N 4)
Manutention du laitier	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	0,04	10 -15
Manutention des produits (concassage tamisage stockage etc.)	0,02 - 0,05	R	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Notes : (N 1) La teneur en Cr(VI) des poussières du four est entre 5 et 100 ppm pour un four fermé et entre 1000 et 7000 ppm pour un four ouvert. (N 2) La quantité de perte de matériau causée par la manutention et le stockage de la matière première est estimée à moins de 2 %. (N 3) L'échantillonnage de l'air de ventilation quittant le bâtiment où se trouve le four comprenant la zone de vidange et de coulée sur de longues durées peut donner une indication des valeurs moyennes. Ces valeurs montrent des concentrations moyennes en poussières entre 5 et 12 mg/Nm ³ et des émissions totales de poussières atteignant de 0,2 à 0,6 kg/tonne d'alliage produit. (N 4) Les présentes émissions de poussières sont dépendantes du type du four et de la technique de dépollution des effluents gazeux utilisée. Par exemple, des filtres à manches atteignent déjà dans de nombreux cas moins de 5 mg/Nm ³ . Les émissions de poussières provenant d'un four de frittage en utilisant un laveur en cascade sont indiquées comme étant inférieures à 4 mg/Nm ³ . (N 5) Ces données illustrent la différence entre de bons et de mauvais résultats. (N 6) Le gaz du four provenant d'un four fermé est utilisé comme combustible après lavage humide. Le gaz n'est brûlé à la torche que si un consommateur est temporairement indisponible. (N 7) Inclus dans le « four de fusion » source. n.d. = non disponible n.p. = non pertinent n.m. = non mesuré f = émissions fugitives de poussières r = les poussières sont recyclées dans le procédé						

Tableau 9.8 : Émissions de poussières lors de la production du ferro-chrome basées sur une tonne d'alliage produit

Source	FeSi		Métal de Si et calcium-silicium	
	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³
Manutention de la matière première	f (N 2)	f (N 2)	f (N 2)	f (N 2)
Séchage des copeaux	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Concassage	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Poste de pesage et de dosage	f	f	F	f
Fusion	0,1 - 2	1 - 20 (N 1)	0,1 - 1,5	1 - 20 (N 1)
vidange	(N 3, 4)	(N 3) 5-12 (N 4)	(N 3, 4)	(N 3) 5-12 (N 4)
Coulée	(N 4)	5 - 12 (N 4)	(N 4)	5 - 12 f (N 4)
Affinage	(N 3)	(N 3)	(N 3)	(N 3)
Concassage du produit	0,3 - 0,5	r	0,3 - 0,5	r.
Notes : (N 1) En utilisant un filtre à manches, certaines usines obtiennent des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm ³ , correspondant à une qualité de traitement supérieure à 99,5 %. La fumée de silice est collectée dans le filtre sous la forme d'un sous-produit (microsilice). (N 2) La quantité de perte de matériau causée par la manutention et le stockage de la matière première est estimée à moins de 0,2 %. (N 3) Si les fumées et les poussières provenant de la zone de vidange sont collectées et traitées dans le filtre à manches, les émissions de poussières sont dans la même plage que la concentration des émissions de poussières provenant du four de fusion. (N 4) L'échantillonnage de l'air de ventilation quittant le bâtiment où se trouve le four comprenant la zone de vidange et de coulée sur de longues durées peut donner une indication des valeurs moyennes. Ces valeurs montrent des concentrations moyennes en poussières entre 5 et 12 mg/Nm ³ et des émissions totales de poussières atteignant de 0,2 à 0,6 kg/tonne d'alliage produit. n.d. = non disponible n.p. = non pertinent n.m. = non mesuré f = émissions fugitives de poussières r = les poussières sont recyclées dans le procédé				

Tableau 9.9 : Émissions de poussières lors de la production de ferro-silicium et de métal de silicium basées sur une tonne d'alliages produits

Source	HC FeMn				MC et LC FeMn		Silico-manganèse	
	HF		Four à arc électrique		kg/t	mg/Nm3	kg/t	mg/Nm3
	kg/t	mg/Nm3	kg/t	mg/Nm3				
Manutention de la matière première	f	f	f	f	f	f	F	f
Poste de pesage et de dosage	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fusion	n.d.	1 - 10	0,1 - 0,4	5 - 60 (N 3)	n.d.	< 25	0,1 - 0,4	5-60 (N 1) (N 3) 1 - 30 (N 2)
vidange	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Coulée	n.d.	n.d. n.d.	0,05 - 0,1	n.d.	0,05 - 0,1	n.d.	n.d.	n.d.
Affinage	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Concassage du produit	0,1 - 0,3	r	0,1 - 0,3	r	0,1 - 0,3	r	n.d.	r
Chaudière de récupération	n.d.	1 - 10	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Production d'électricité	n.d.	1 - 10	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
Notes : (N 1) Émissions de poussières provenant d'un four fermé étanche avec un laveur venturi (N 2) Émissions de poussières provenant d'un four ouvert (N 3) Si le dépoussiérage des effluents gazeux provenant d'un four fermé étanche a lieu dans un laveur en cascade, des émissions de poussières inférieures à 10 - 20 mg/Nm ³ sont obtenues. Certaines usines qui utilisent des fours semi-fermés utilisant des filtres à manches pour le dépoussiérage atteignent des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm ³ HF = Haut fourneau n.d. = non disponible n.p. = non pertinent f = émissions fugitives de poussières r = les poussières sont recyclées dans le procédé.								

Tableau 9.10 : Émissions de poussières lors de la production de ferro-manganèse et de silico-manganèse basées sur une tonne d'alliage produit

	Fe Ni	FeV	FeMo	FeTi	FeB	Grillage de la molybdénite
Source	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
Manutention de la matière première	1 - 15	< 5	0,5 - 2	1 - 15	1 - 15	1 - 15
Séchage de la matière première	1 - 15 < 1 (N 2)	n.p.	4 - 17	1 - 15	1 - 10	n.p.
Concassage		n.p.	1 - 5			n.p.
Granulation		n.p.	n.p.			n.p.
Frittage/ Grillage		n.p.	n.d.			1 - 15
Dosage		n.p.	1			n.m.
Préchauffage		n.p.	n.p.			n.p.
Fusion	1 - 15	< 5	1 - 30	1 - 15	1 - 10	n.p.
Basculement/vidange	n.d.		5 - 15 (N 1)	n.d.	n.d.	n.p.
Coulée				n.d.	n.d.	n.p.
Manutention du laitier	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.p.
Concassage du produit	1 - 15	< 5	0,5 - 5	n.d.	n.d.	n.m.
Notes : (N 1) Les émissions sont estimées à partir des ventilateurs d'extraction placés au plafond. (N 2) Les données correspondent à la production de FeNi secondaire quand un filtre à membrane moderne est utilisé. Les chiffres présentés donnent la quantité d'oxyde de Ni comme faisant partie des poussières émises provenant du four rotatif. n.d. = non disponible n.p. = non pertinent n.m = non mesuré f = émissions fugitives de poussières r = les poussières sont recyclées dans le procédé						

Tableau 9.11 : Émissions de poussières dans l'air (après dépollution) lors de la production de ferroalliages

9.2.2.1.2 Autres émissions dans l'air

Les polluants les plus importants issus de la production des ferroalliages en plus des poussières sont le SO_2 , le NO_x , le CO , le CO_2 , le HF , les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils (COV) et les métaux lourds (métaux en trace). La formation des dioxines dans la zone de combustion et dans la zone de refroidissement du système de traitement des effluents gazeux (synthèse de novo) peut être possible. Les émissions peuvent s'échapper du procédé soit sous forme d'émissions canalisée soit sous forme d'émissions fugitives en fonction de l'âge de l'usine et de la technologie utilisée. Les émissions canalisées sont normalement surveillées en continu ou périodiquement et déclarées, par le personnel du site ou des consultants externes, aux autorités compétentes.

Dans le procédé carbothermique, seule le contenu en carbone fixé est utilisé comme agent réducteur, c'est-à-dire le contenu qui reste quand les matières volatiles, les cendres et l'humidité sont déduites. La matière volatile est principalement constituée par des hydrocarbures, et ne prend pas part à la réaction mais quitte le four conjointement avec le CO quand le four est fermé ou brûle près de la surface dans un four semi-fermé ou ouvert. Dans les deux cas, le contenu énergétique des matières volatiles est utilisé.

La teneur en soufre dans le coke métallurgique varie entre 0,4 et 1,0 %. De 60 à 85 % du soufre restent dans le laitier et environ 5 % s'échappent du four sous la forme de SO_2 . La production d'alliages de silicium requiert différents agents réducteurs tels que le charbon, le coke, le coke de pétrole et le charbon de bois. Ce matériau contient différentes quantités de soufre, les variations typiques sont entre 0,5 et 3 %. Dans la production d'alliages de silicium, qui ne produit presque pas de laitier, presque tout le soufre s'échappe du four sous forme de SO_2 ou sous forme de soufre lié à la microsilice. En utilisant un agent réducteur ou un mélange de différentes sources de carbone, qui contient au total une teneur en soufre élevée d'environ 2 à 3 %, des émissions de SO_2 supérieures peuvent se produire.

Les effluents gazeux générés par grillage des concentrés de molybdénite contiennent de grandes quantités de SO_2 qui sont normalement traités dans une unité de désulfuration produisant de l'acide sulfurique. Des informations détaillées sur les unités de désulfuration sont données dans le Chapitre 2 de ce document. Le gaz de queue provenant de l'unité de désulfuration d'un four de grillage de molybdénite contient du SO_2 puisque la conversion du SO_2 en SO_3 atteint difficilement 100 %. Les effluents gazeux contiennent également une certaine quantité de brouillard d'acide sulfurique ainsi qu'une certaine quantité de SO_3 .

Les métaux lourds sont apportés au procédé sous forme d'éléments-traces dans la matière première. Les métaux ayant des points d'ébullition en dessous de la température du procédé s'échappent via les rejets gazeux sous la forme d'une vapeur de métal, qui se condense partiellement et s'oxyde pour former une partie des poussières provenant du four de fusion. Même après la vidange et spécialement pendant l'affinage, la température du métal en fusion et du laitier est suffisamment élevée pour permettre la vaporisation des composants à la fois du métal et du laitier. Les fumées provenant de cette évaporation sont émises tout le temps, depuis le début de la vidange jusqu'à ce que la coulée soit finie. Même après que la poche est vidée, certaines fumées peuvent se développer dans le loup de poche de métal. Pendant la vidange, la plupart des fumées sont collectées et traitées, par la collecte des fumées de la vidange.

En fonction du type du minerai qui est utilisé, du mercure peut être émis dans l'air. Les informations collectées indiquent qu'une usine produisant du SiMn a des émissions élevées de mercure en raison d'une teneur élevée en mercure dans la matière première. Les autres producteurs de FeMn et /ou de SiMn peuvent utiliser la même matière première avec une teneur supérieure en mercure. La régulation de l'apport de mercure dans le four et la régulation de la production ultérieure de mercure par les procédés est donc conseillée, si de telles matières premières sont utilisées. Dans ce cas, la matière première nécessite un prétraitement pour enlever le mercure, sinon le mercure doit être enlevé des effluents gazeux du four en utilisant une étape d'élimination du mercure.

Dans la production du FeMo, du spath fluor peut être utilisé pour améliorer la séparation du laitier et du métal. Le spath fluor est un minéral de fluorure de calcium qui est utilisé comme fondant et qui abaisse le point de fusion et la viscosité du laitier, entraînant une fluidité accrue du laitier. De plus, quand il est mélangé avec de la chaux, il réduit la teneur en phosphore et en soufre du métal. Les points de fusion inférieurs favorisent la séparation métal-laitier, puisque le laitier reste plus longtemps liquide pendant le refroidissement. Cet effet, conjointement avec la viscosité réduite, permet aux petites gouttelettes dispersées de couler et de coaguler dans la phase métallique au fond. Cependant, l'utilisation du spath fluor comme fondant entraîne des émissions de fluorures dans la plage de 150 à 260 mg/Nm³. Du fait de la nature biotoxique du fluorure, l'utilisation du spath fluor doit être minimisée autant que possible.

Le Tableau 9.12 ci-dessous présente quelques chiffres d'émissions dans l'air récemment mesurées lors de la production de ferroalliages courants.

	FeCr				FeSi		Métal de Si		FeMn				Silico- manganèse			
	HC FeCr		MC et LC FeCr						HC FeMn							
									HF		Four à arc électrique					
	kg/t	mg/N m³	kg/t	mg/N m³	kg/t	mg/Nm³	kg/t	mg/N m³	kg/t	mg/Nm³	kg/t	mg/Nm³	kg/t	mg/N m³	kg/t	mg/N m³
SO ₂	0,2 - 3,0	n.d.	n.p.	n.p.	20 (N 7)	230	12 - 18	100 - 160	1 - 1,5	n.d.	0,002 - 0,1	n.d.	n.d.	n.d.	0,002 - 0,1	n.d.
CO	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	traces	traces	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CO ₂	1 200 - 2 000 (N 1)	n.d.	110 (N 3)	n.d.	4 240- (N 4)	55 g/Nm³	6 500 (N 4)	55 g/Nm³	4 000 - 4 500	n.d.	1 200 - 1 500	n.d.	1 560 - 2 340 (N 5)	n.d.	1 100 - 1 800	n.d.
NO _x	0,5 - 1,5	n.d.	n.m.	n.m.	15	170	10 - 13	80 - 110	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
HF	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PCDD/F	0,2 g/a (N 2)	n.d.	n.m.	n.m.	5 µg/t (N 8)	n.d.	3 µg/t (N 8)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Métaux lourds	Cr (dans les poussières) 1 - 15 % CrVI 0,1 - 0,3 % (N 6)	n.d.	Cr < 0,01 Cr ⁶⁺ < 0,002	n.d.	n.d.	0,78 µg Hg/Nm³ (N8)	n.d.	0,131 µg Hg/Nm³ (N 8)	Hg (n.d.)	n.d.	Hg (n.d.)	n.d.	n.d.	n.d.	Hg (0 - 0,002)	n.d.
HAP	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	0,0015 (N 8)	0,02	0,003 (N 8)	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
COV	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	0,045 (N 8)	0,9	0,13 (N 8)	0,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cyanures	0,02 - 0,05	n.d.	n.d.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Notes : (N 1) Les émissions de CO ₂ comprennent les émissions totales issues de la fusion de prétraitement et des procédés post-four. L'utilisation externe du CO provenant du four de fusion réduit les émissions locales provenant de l'usine de FeCr uniquement. (N-2) La quantité annuelle d'émissions de dioxine ne correspond qu'à un four de frittage. Les dioxines provenant d'un four de frittage ont été mesurées à une valeur de 1,5-4 g/a. Cette donnée est cependant limitée et nécessite un examen plus poussé. (N 3) Les émissions correspondent à 80 kg/t pour le gaz naturel brûlé au sécheur, au chauffage de la poche etc. et 30 kg/t pour les pâtes d'électrode qui sont consommées. (N-4) Ces données relatives au CO ₂ contiennent la quantité de CO ₂ fossile ainsi que la quantité de CO ₂ biologique. (N 5) Ces données relatives au CO ₂ correspondent à la production silicothermique de LC FeMn. Les émissions de CO ₂ lors de la production du MC FeMn à partir du HC FeMn sont d'environ 100 à 500 kg/t d'alliage. (N 6) La quantité de Cr VI dans les poussières est émise par un four semi-fermé ; cyanures = 0,2 - 0,05 à partir d'un four fermé. (N 7) La valeur élevée correspond à une production de FeSi de haute pureté dans laquelle une grande quantité de coke de pétrole est utilisée. (N 8) Résultats d'études exhaustives sur 24 heures d'émissions d'air issues de la production de FeSi 75 et de métal de Si haute pureté. Dans ce cas il convient de noter que les données sont basées sur des périodes de mesure relativement courtes sur deux usines spécifiques, et ne doivent pas être considérées comme étant générales à l'industrie. Davantage de mesures sont prévues dans ce secteur. : n.d. = non disponible n.p. = non pertinent n. m. = non mesuré																

Tableau 9.12 : Émissions dans l'air (après dépollution) lors de la production de ferroalliages courants

Les émissions majeures dans l'air lors de la production du ferro-nickel primaire sont listées dans le tableau montré ci-dessous.

Opération	Émissions dans l'air									
	Poussières/Fumées			Gaz						
	Total	Ni	Autres	SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	H ₂ S	Ni(CO) ₄	autres
Concassage du minéral	NE	FN	-	-	-	-	-	-	-	-
Séchage	NE	NE	-	FN	NM	FN		-	-	-
Grillage	NE	NE	-	NE	NM	FN	FN	-	-	-
Calcination réductrice	NE	FN	-	FN	NM	FN	FN	-	-	-
Fusion	NE	FN	-	-	NM	NM	FN	-	-	-
Convertissage	NE	NM	SiO ₂	-	NM	FN	FN	-	-	-
Coulée	NE	FN	-	-	-	-	-	-	-	-

TFN Très faible niveau FN Faible niveau - Absent
 NM Niveau moyen NE Niveau élevé

Tableau 9.13 : Émissions dans l'air provenant de la production du ferro-nickel

[tm 109, UNEP 1993]

Les chiffres de concentration des émissions pour la production de ferroalliages recyclés à partir de résidus d'aciérie dans un four à arc électrique immergé sont présentés ci-dessous.

Polluants	Concentrations (gaz et particules) mg/Nm ³
Poussières	2 - 5
SO ₂	< 100
CN	0,002 - 0,006
HC	< 50
F	0,1 - 1,5
Cd	< 0,001
Cd + Hg + Ti	< 0,1
As	< 0,003
Se	< 0,002
Te	< 0,002
Zn	0,02 - 0,05
Pb	< 0,005
CO ₂	1,2 - 1,5 t/t d'alliage

Tableau 9.14 : Chiffres de concentration des émissions lors de la production de ferroalliages secondaires

9.2.2.2 Émissions de bruit et de vibrations

La machinerie lourde telle que les concasseurs et les grands ventilateurs utilisés dans la production des ferroalliages peut entraîner des émissions de bruit et de vibration. De plus, le loup de poche mécanique venant des poches peut être une source de bruit.

9.2.2.3 Émissions dans l'eau

Pour la production des ferroalliages, les émissions dans l'eau sont très dépendantes du procédé, par exemple du système de dépollution et du type du traitement des eaux usées utilisés. Il existe une variété de différents systèmes de collecte de l'eau et de traitement des eaux usées dans l'industrie des ferroalliages. Certaines usines utilisent une usine de traitement des eaux usées centrale dans laquelle l'eau issue des différents procédés de production ainsi que l'eau de ruissellement de surface sont

traitées ensemble. D'autres installations utilisent un système de traitement distinct pour l'eau de pluie et des procédés de traitement spéciaux pour les différents courants d'eaux usées du procédé. Les principaux polluants de l'eau sont les solides en suspension et les composés métalliques. Les eaux usées sont traitées afin d'éliminer les métaux et les solides dissous et elles sont recyclées ou réutilisées autant que possible dans le procédé. Les écoulements d'eaux usées possibles sont :

- Eau de ruissellement de surface et de drainage
- Eaux usées provenant des laveurs humides
- Eaux usées issues de la granulation du laitier et des métaux
- Eau de refroidissement

L'eau contaminée est normalement amenée vers un bac d'épaississement ou un bassin de décantation pour laisser décanter les solides en suspension. Des étapes de précipitation sont souvent utilisées pour enlever les composés métalliques de l'eau. Dans certains cas spéciaux, par exemple quand on nettoie l'eau de lavage provenant d'un four de grillage de la molybdénite, des échangeurs d'ions sont utilisés pour enlever les composés métalliques tels que le sélénium et le rhénium de l'eau de lavage.

Les particules sont principalement constituées par des particules très fines, il peut donc être nécessaire d'ajouter un flocculant pour favoriser la décantation dans les bacs d'épaississement. Après le traitement dans un bac d'épaississement ou un bassin de décantation, les solides en suspension sont habituellement en dessous de 20 mg/litre, ce qui permet leur réutilisation dans les laveurs comme eau de refroidissement ou comme eau de traitement à d'autres fins.

Lors de la production du FeCr dans un four fermé, les émissions typiques dans l'eau, ramenées à une tonne de FeCr produit, seront pour les solides en suspension dans la plage de 5 à 10 g avec une quantité totale en Cr de 10 à 20 mg et une quantité de HAP de 0,3 à 1 g. Le traitement de l'eau de traitement comprend dans ce cas un bac d'épaississement à lamelles, des filtres sous vide, un filtre à sable et à carbone. Si un bac d'épaississement, une granulation du laitier et des bassins de décantation sont utilisés, les émissions de solides en suspension sont en conséquence de 75 à 150 g avec une quantité totale de Cr d'environ 5 g, de zinc de 3 à 7 g et de cyanure dans la plage de 1 à 3 g/tonne de FeCr. Pour la production du LC FeCr, les informations rapportées indiquent que la quantité de Cr rejetée dans les eaux usées est inférieure à 0,3 g/tonne de produit. Les émissions de HAP dans l'eau après dépollution pour la production du FeMn ont été rapportées comme étant dans la plage de 0,05 à 0,2 g/t de FeMn.

Les eaux usées contaminées du système de laveur d'une usine de récupération des alliages sont traitées dans une usine de traitement des eaux usées distincte, dans laquelle l'eau de pluie du site peut également être traitée. Les particules partiellement oxydées contenues dans l'eau sont concentrées dans un bac d'épaississement et dans une étape ultérieure elles sont séparées de l'eau libre dans deux filtres presses. Le gâteau de filtration résultant ayant de 20 à 25 % d'humidité est constitué par les principaux constituants suivants :

ZnO	30 - 40 %
SiO ₂	10 - 15 %
CaO	5 - 15 %
FeO	5 - 7 %
PbO	3-5 %
Hg	0,001 %

La quantité de gâteau sec générée est de 200 à 400 kg/tonne d'alliage.

Ce gâteau de filtration est expédié à intervalles réguliers pour le recyclage du zinc et du plomb soit dans un procédé ISP soit dans un procédé Waeltz.

En raison de la nécessité de réguler la concentration du sel dans les eaux usées, le soutirage à partir de l'eau en circulation du système de laveur, environ 0,5 à 2 m³/tonne de ferroalliages récupérés sont traitées en plusieurs étapes.

- Élimination du cyanure
- Réduction du Cr⁶⁺ en Cr³⁺
- Précipitation des hydroxydes de métaux à pH élevé conjointement avec une oxydation des cyanures
- Précipitation du fluorure et élimination des particules dans un filtre à sable

Le traitement des eaux usées entraîne des émissions dans l'eau, qui sont présentées ci-dessous.

	As	Cr	Ni	Zn	Cu	Cd	Pb	Hg	F	N	CN
g/t	0,002	0,02	0,03	0,06	0,03	0,006	0,006	0 - 0,005	9,0 - 28,0	12 - 64	0 - 0,08
		- 0,06	- 0,08	- 0,16	- 0,08	- 0,03	- 0,03				

Tableau 9.15 : Émissions dans l'eau lors du recyclage de ferroalliages à partir de résidus d'aciérie en utilisant le procédé de plasmadust avec un laveur humide comme technique de dépollution

Les données rapportées pour une usine de traitement des eaux usées pour un four de grillage de molybdénite sont présentées dans le tableau suivant.

H ₂ SO ₄ kg	HF kg	Mo mg	Bi mg	Pb mg	Cu mg	Zn mg	Sn mg	DCO Mg	Re mg	As mg	Se mg
32,9	0,3	25,9	0,03	0,29	0,05	1,72	0,03	0,42	7,10	0,26	0,29

Notes : Éléments basés sur 1 tonne de Mo produit sous forme de trioxyde de molybdène

Tableau 9.16 : Émissions dans l'eau lors du grillage de la molybdénite

9.2.2.4 Sous-produits, résidus et déchets issus du procédé

La production des ferroalliages est liée à la génération d'un certain nombre de sous-produits, de résidus et de déchets, qui sont également listés dans le catalogue européen des déchets (décision du conseil 94/3/EEC). Les résidus spécifiques au procédé les plus importants sont les poussières sous filtre, la boue provenant des laveurs, le laitier issu du procédé de fusion, les garnissages du four usagés et les matériaux de conditionnement tel que les fûts ou les big bags. Ces résidus sont partiellement vendus sous forme de sous-produits, recyclés dans le procédé ou dans le cas des déchets sans utilité économique, transportés vers un site de stockage ou une décharge. La quantité de laitier et de poussières sous filtre ou de boue générée par tonne de ferroalliage produit et leurs possibilités de valorisation sont montrées dans les tableaux suivants.

Ferroalliage		Laitier/t d'alliage	Composition analytique	Recyclage, réutilisation et élimination
FeCr	HC FeCr	1,0 - 0,17 t/t	Principalement mélange de spinelle. MgO, Al ₂ O ₃ , forstérite, 2MgO, SiO ₂ et Cr ₂ O ₃ (3 -15 %). Le laitier est très stable chimiquement	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier concassé en morceaux et le laitier granulé sont utilisés comme matériau de construction de bâtiments et matériaux de construction de routes Le laitier peut également être utilisé comme grille de ventilation pour le sable, et pour la production de bétons réfractaires
	MC FeCr	n.d.	n.d.	
	LC FeCr	1 t/t	CaO 44 - 45 % SiO ₂ 23-33 % MgO 9 - 13 % Al ₂ O ₃ 5 - 9 % Cr ₂ O ₃ 2,5 - 6,5 % FeO 0,6 - 1,2%	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier sera mis en décharge
Récupération de l'alliage à partir des résidus d'aciérie		0,4 - 1,2 t/t	CaO 25 - 40 % SiO ₂ 35 - 50 % MgO 3 - 15 % Al ₂ O ₃ 12 - 18 % Cr ₂ O ₃ < 3 % Fe ₂ O ₃ < 2 %	<ul style="list-style-type: none"> La faible basicité du laitier (de 0,7 à 0,8) assure la formation de silicates stables, qui sont non lixiviables. Le laitier est utilisé dans diverses applications relatives à la construction.
Métal de silicium FeSi		20 - 30 kg/t	Si ou FeSi 20 - 30 % SiO ₂ 5 - 20 % SiC 20 -40 % CaO 25 - 40 % Al ₂ O ₃ 3 - 35 %	<ul style="list-style-type: none"> La production de métal de silicium et de FeSi est un procédé ne générant presque pas de laitier (de petites quantités de quartz sont transformées en laitier, < 1 %). Le laitier ira en décharge. Pendant l'affinage du métal de silicium et du FeSi, de petites quantités de laitier d'affinage sont produites. Le laitier ira en décharge.
Calcium-silicium		0,4 - 0,6 t/t	SiO ₂ 10 - 20 % SiC 15 -25 % CaO 50 - 60 % Al ₂ O ₃ 5 - 10 % CaC ₂ 3 - 8 %	<ul style="list-style-type: none"> Tout le laitier est recyclé dans le four
FeMn	HC FeMn	Haut fourneau 0,4 - 0,8 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier épuisé standard (faible teneur en MnO) d'un haut fourneau est utilisé comme matériau de construction Le laitier riche d'un haut fourneau (teneur élevée en MnO) est vendu sous forme de matière première pour la production de silico-manganèse
		Four à arc électrique 0,4 - 0,8 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier épuisé standard (faible teneur en MnO) est utilisé comme matériau de construction Le laitier riche (teneur élevée en MnO) est vendu sous forme de matière première pour la production de silico-manganèse
	MC FeMn	1,6 - 1,9 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier est utilisé comme matière première dans la production de silico-manganèse
	LC FeMn	1,6 - 1,9 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier est utilisé comme matière première dans la production de silico-manganèse
SiMn		0,9 - 2,2 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier est utilisé comme matériau de construction
FeNi		n.d.	n.d.	<ul style="list-style-type: none">
FeV		2,6 - 3 t/t	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier est vendu sous forme de matière première secondaire à l'industrie de traitement, par exemple pour la production de réfractaires.
FeMo		1,5 - 2 t/t (N 1)	n.d.	<ul style="list-style-type: none"> En fonction de la composition, le laitier est vendu pour une transformation supplémentaire ou mis en décharge
FeW, FeTi, FeB		n.d.	n.d.	
FeNb		1,9 t/t	n.d.	
Notes : (N 1) Le laitier/tonne d'alliage pour le Fe Mo comprend le poids du sable qui est fixé au laitier.				

Tableau 9.17 : Génération, recyclage, réutilisation et élimination du laitier de ferroalliage

Ferroalliage		Poussières ou boues/t d'alliage	Recyclage, réutilisation et élimination
FeCr	HC FeCr	20 - 80 kg/t (N 1)	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières provenant du four seront mises en décharge Les poussières issues du concassage et du tamisage sont refondues dans le four, ou sont utilisées dans la production d'acier inoxydable Les poussières provenant des systèmes de transport de la matière première, et des postes de séchage, d'agglomération et de dosage du coke peuvent être recyclées dans les procédés La boue provenant du laveur humide contiendra des HAP et des métaux lourds et doit être éliminée dans une décharge de déchets dangereux Environ 8 - 10 kg/t de poussières plus grossières ayant une teneur élevée en chrome qui est collectée dans une chaudière de récupération après un four semi-fermé peuvent facilement être remis en circulation vers le four après agglomération
	MC FeCr	n.d.	•
	LC FeCr	70 kg/t	• Les poussières sont recyclées vers le four de fusion
Récupération de l'alliage à partir des résidus d'aciérie		100 - 500 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières du four ont une teneur élevée en ZnO (20 - 60 %) et en PbO (2 - 6 %). Elles sont pelletisées et recyclées par l'industrie du Zn (four de fusion I.F., ou en utilisant le procédé Waelz comme étape de concentration intermédiaire. La boue provenant du laveur humide contiendra des HAP et des métaux lourds et doit être éliminée dans une décharge de déchets dangereux
FeSi		200 - 300 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> La fumée de silice (microsilice) est collectée dans le filtre à manche et vendue sous la forme d'un sous-produit. La microsilice est utilisée comme additif de ciment, ce qui augmente la résistance du béton et donne une surface très lisse qui protège le béton des infiltrations d'eau.
Métal de silicium		300 - 400 kg/t	
FeMn	HC FeMn	Haut fourneau 100 - 300 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> La partie plus grossière des poussières qui est relativement riche en manganèse est agglomérée et recyclée dans le four ou utilisée comme matière première pour la production de silico-manganèse dans un four à arc électrique. Les poussières fines peuvent parfois être valorisées dans d'autres industries ou sont éliminées dans une décharge La boue provenant du laveur humide contiendra des HAP et des métaux lourds et doit être éliminée dans une décharge de déchets dangereux
		FAE 30 - 50 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières et la boue sont recyclées, valorisées dans d'autres industries ou éliminées dans une décharge La boue provenant du laveur humide contiendra des HAP et des métaux lourds et doit être éliminée dans une décharge de déchets dangereux
	MC FeMn	FAE 30 - 50 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières et la boue sont recyclées, valorisées dans d'autres industries ou éliminées dans une décharge
	LC FeMn	FAE 30 - 50 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières et la boue sont recyclées, valorisées dans d'autres industries ou éliminées dans une décharge
SiMn		30 - 50 kg/t	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières et la boue sont recyclées, valorisées dans d'autres industries ou éliminées dans une décharge La boue provenant du laveur humide contiendra des HAP et des métaux lourds et doit être éliminée dans une décharge de déchets dangereux
FeNi		n.d.	•
FeV		n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières sont recyclées dans le procédé de fusion ou être partiellement éliminées dans une décharge
Grillage de la molybdénite		n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Les effluents gazeux quittant le four de grillage contiennent des poussières représentant jusqu'à 15 % du concentré dans la charge. La majeure partie des poussières et des boues issues du traitement des effluents gazeux est recyclée dans la charge contenant le concentré.
FeMo		n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières sont recyclées dans le procédé de fusion ou partiellement éliminées dans une décharge spéciale
FeW, FeTi, FeB, FeNb		n.d.	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières provenant du four sont éliminées dans une décharge, mis à part pour une certaine quantité de FeNb
Notes :			
(N 1) La composition des poussières ou de la boue varie en fonction du four de fusion et des matières premières utilisés.			
(N 2) Dans les poussières provenant d'un four à ferro-chrome semi-fermé, une teneur en Cr VI de 0,1 à 0,3 % a été détectée			

Tableau 9.18 : Génération, recyclage, réutilisation et élimination des poussières et de la boue provenant du système de dépollution de l'air

9.2.3 Récupération de l'énergie

La production des ferroalliages est un procédé très consommateur d'énergie, parce que des températures élevées sont nécessaires à la réduction des oxydes de métaux et à la fusion. Les facteurs affectant la consommation d'énergie sont entre autres choses la qualité de la matière première et de leur prétraitement avant la fusion, l'utilisation des énergies de réaction et le contenu thermique des procédés. L'énergie utilisée dans le procédé peut être fournie sous forme d'énergie électrique ou de combustible fossile sous la forme de charbon, de coke, de charbon de bois ou parfois de gaz naturel. L'énergie fournie soit dans un haut fourneau soit dans un four à arc électrique est transformée en énergie chimique formée par le procédé de réduction ainsi que par l'énergie des effluents gazeux (gaz riche en CO) et en chaleur.

L'énergie des effluents gazeux est principalement représentée par la chaleur de procédé dans le cas d'un four semi-fermé ou par le contenu en CO, CH₄ et H₂ quand un four fermé est utilisé. Des gaz de procédé sont produits dans le procédé de fusion si du carbone est utilisé comme agent réducteur. Le CO peut être utilisé comme combustible secondaire et transféré au moyen de conduites à l'intérieur du site de l'usine comme tout autre gaz combustible. Il peut être utilisé par combustion directe, par exemple dans le four de frittage et pour le séchage ou le préchauffage de la charge du four, ainsi que pour la récupération de l'énergie sous la forme d'eau chaude, de vapeur d'eau et/ou d'électricité.

Lors de la production de HC FeMn dans un haut fourneau, le gaz riche en CO situé dans la partie supérieure sera dépoussiéré et partiellement utilisé pour réchauffer les étuves chaudes. Le gaz en excès est brûlé dans une centrale électrique adjacente pour produire de la vapeur d'eau surchauffée puis de l'énergie électrique dans une turbine à contre-pression.

Le diagramme énergétique ci-dessous montre le flux d'énergie dans un four à arc électrique immergé de 10 MW pour la production de métal de silicium.

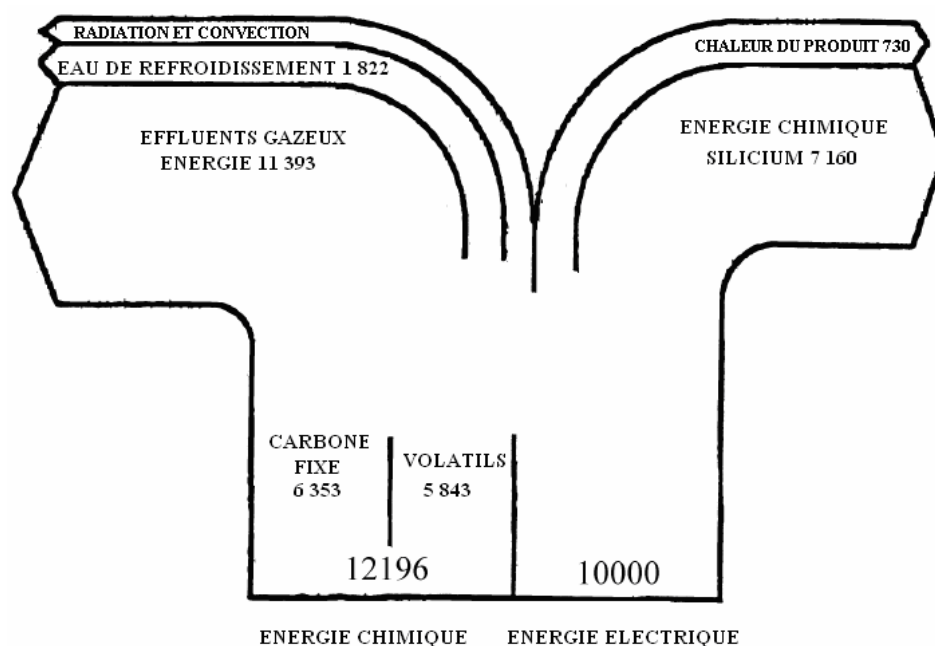


Figure 9.13 : Flux d'énergie dans un four à silicium de 10 MW [tm 152, A. Schei, J.K.Tuset, H. Tveit 1998]

Si un four à arc électrique immergé semi-fermé est utilisé pour la production de FeCr, de FeSi, de métal de silicium, de SiMn ou de FeMn, le CO gazeux issu du procédé de fusion brûle dans l'air, créant ainsi des effluents gazeux chauds. Les fours semi-fermés sont donc parfois équipés d'une chaudière de récupération comme système de récupération de l'énergie intégré. La chaudière de récupération génère de la vapeur d'eau surchauffée qui peut être vendue aux ateliers voisins ou utilisée pour la production d'électricité dans une turbine à contre-pression.

Lors de la production de FeCr, de FeMn ou de SiMn dans un four à arc électrique fermé, les effluents gazeux contiennent un pourcentage très élevé de CO, qui est collecté sans être brûlé au dessus de la surface de la charge. Ce CO est un combustible de haute qualité qui est favorablement utilisé pour la production d'électricité ou fourni à une usine industrielle voisine comme combustible secondaire ou comme gaz de synthèse qui sert de matière première dans les procédés chimiques. Une composition typique d'un gaz riche en CO, formé dans un four fermé produisant du HC FeCr, contient de 75 à 90 % de CO, de 2 à 15 % de H₂, de 2 à 10 % de CO₂, de 2 à 5 % de N₂ et < 5 % de H₂O.

Les tableaux suivants donnent une vue d'ensemble des différentes possibilités de récupération de l'énergie et de l'utilisation de l'énergie récupérée.

Ferroalliage	Nombre d'usines	Énergie électrique utilisée [GWh/a]	Récupération possible [GWh/a]			Récupération véritable [GWh/a]		
			Énergie électrique	Énergie thermique	Total	Énergie électrique	Énergie thermique	Total
FeCr	1	360		140	140			
FeSi	9	4 940	856	1 024	1 880	115	183	298
Métal de Si	3	1 250	163	215	378		1	1
FeMn SiMn	3 (N 1)	1 850	80	550	630	80	216	296
Total	16	8 400	1 099	1 929	3 028	195	400	595 (N 2)
Notes : Données sur la récupération de l'énergie de 16 usines norvégiennes de ferroalliages. [tm 159, INFACON 7, 1995]								
(N 1) Le gaz est partiellement utilisé comme combustible ou gaz synthétique								
(N 2) Parmi les 16 usines de ferroalliages rapportées en 1989, l'énergie a été récupérée par 8 usines								

Tableau 9.19 : Vue d'ensemble de la récupération de l'énergie dans l'industrie norvégienne de ferroalliages en 1989 [tm 159, INFACON 7, 1995]

Ferroalliage	HC FeCr		HC FeMn			SiMn		FeSi	Si
	F AE semi-fermé	F AE fermé	Haut fourneau	F AE semi-fermé	F AE fermé	F AE semi-fermé	F AE fermé	F AE semi-fermé	F AE semi-fermé
Séchage	■	■		■	■		■		
Chauffage de la poche		■			■		■		
Frittage		■			■		■		
Préchauffage	■	■	■ Étuves chaudes		■		■		
Eau chaude	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vapeur d'eau	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Électricité	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ateliers voisins		■			■		■		■
Remarque : La récupération de l'énergie n'est pas toujours utilisée car il faut prendre en compte les conditions locales, par exemple les prix locaux de l'énergie, les périodes de production et l'absence de consommateurs possibles.									

Tableau 9.20 : Réutilisation de l'énergie lors de la production des ferroalliages courants

9.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les États membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les principaux procédés et de les procédés associés.

9.3.1 Matériaux, stockage et manutention

Les matières premières généralement utilisées pour la production de ferroalliages sont les minerais, les concentrés, les agents réducteurs, les combustibles solides et les additifs. Les principaux impacts environnementaux par stockage et manutention de ces matériaux sont les émissions fugitives de poussières et la contamination de l'eau de surface et des sols causée par le lessivage de l'eau de pluie.

Pour prévenir la contamination, les matières premières sont stockées de préférence sur des surfaces dures où un stockage à l'intérieur et à l'extérieur peut être utilisé, en fonction de la nature potentiellement poussiéreuse et des propriétés chimiques des matériaux. Pour garder les matériaux propres, la zone de stockage peut également être divisée en différentes halles de stockage. Il faut stocker et manipuler les matériaux secs à fine granulométrie à l'intérieur, où des silos, des bennes et des trémies fermés sont utilisés pour prévenir les émissions fugitives dans l'environnement ainsi que dans l'espace de travail. La formation excessive de poussières peut également être prévenue par pulvérisation d'eau sur les matériaux fins et secs.

Des convoyeurs et systèmes de transfert fermés sont utilisés pour la manutention des matériaux fins et poussiéreux, où un équipement d'extraction et de filtration est utilisé pour les points de livraison où se forment beaucoup de poussières. L'air chargé de poussières provenant des silos, des convoyeurs fermés et des systèmes de chargement est traité à l'aide de filtres à manche, qui peuvent être surveillés en mesurant la perte de charge pour réguler le mécanisme de décolmatage. Certaines usines utilisent des concasseurs ou un équipement d'agglomération pour obtenir la taille souhaitée du matériau de chargement. Les filtres à manche nettoient l'air extrait des concasseurs et de l'équipement d'agglomération. Les systèmes de broyage, de filtration et de granulation par voie humide sont également adéquats pour prévenir la formation de poussières. Dans ce cas, l'eau est recyclée. Les installations de concassage sont fabriquées de telle manière que les nuisances sonores et les vibrations sont minimisées. Les poussières collectées sont recyclées dans le système de chargement, ce qui peut nécessiter une étape d'agglomération supplémentaire.

9.3.2 Techniques de prétraitement

Généralement, les minerais de qualité élevée, spécialement pour la production du FeCr, ne sont pas facilement disponibles sous forme de matériau en morceaux. La valorisation des minerais de qualité médiocre, par broyage par voie humide et la valorisation par des méthodes par gravité par voie humide (séparation à liquide dense, séparation dans un tamis vibrant - jiggage, séparation par spirales, tables de lavage etc.), pour enlever les minéraux de la gangue et augmenter par exemple la teneur en Cr_2O_3 , devient donc une façon de procéder de plus en plus courante sur la planète. La plupart de ces méthodes donnent un produit de haute qualité à fine granulométrie, qui doit être déshydraté par filtration et aggloméré par briquetage, frittage ou granulation/frittage avant la fusion.

La réductibilité des différents minerais est assez variable. En règle générale pour la production du FeCr, les minerais podiformes sont facilement réduits alors que les minerais stratiformes ne le sont pas aussi facilement. Pour cette raison, les minerais podiformes donnent le plus souvent une récupération

du chrome dépassant 90 %, tandis que certains des minerais stratiformes ont une récupération inférieure à 80 % dans les voies de production de type conventionnel. C'est le cas pour les minerais sud-africains. Avec le procédé plasma en C.C., la récupération serait supérieure à 90 %. Ceci compense la consommation plus élevée d'énergie électrique, nécessaire pour augmenter la température du procédé pour obtenir une réduction plus rapide. Une autre manière d'augmenter la vitesse de réduction des minerais stratiformes est d'augmenter la surface de réaction. Ceci peut être réalisé par broyage du minerai jusqu'à une taille très fine et granulation/frittage. Pour les minerais podiformes, les avantages de la récupération de ces autres voies de procédé ne seront pas aussi importants.

La matière première primaire telle que le coke ou la matière première secondaire telle que les tournures de titane et les déchets de métal doivent être séchées avant d'être utilisées dans le procédé. Dans certains cas, le séchage du coke est nécessaire pour enlever l'humidité et, en fonction du climat, la neige et la glace.

EXEMPLE 9.01 SECHAGE DU COKE DANS UN FOUR A CUVE

Description : Un four à cuve est utilisé pour le séchage du coke dans la production d'un ferro-chrome. Le four utilise comme combustible des effluents gazeux riches en CO provenant du four de fusion. Pour l'équipement de dépollution, un filtre à manche ou un laveur humide peut également être utilisé.

Principaux bénéfices environnementaux : Un four à cuve génère moins de poussières et de fines. L'utilisation d'effluents gazeux riches en CO comme combustible réduit la consommation globale d'énergie du procédé. La consommation d'énergie du CO est de 550 à 700 MJ

Données opérationnelles : Non disponible

Effets croisés : L'utilisation d'un gaz riche en CO comme combustible réduit la consommation des autres combustibles naturels.

Aspects économiques : Non disponible

Applicabilité : Toutes les usines nouvelles et existantes qui utilisent du coke trempé humide. L'utilisation d'effluents gazeux riches en CO correspond aux usines utilisant des fours fermés.

Documents de référence : [tm 141, Finlande 1998]

Les déchets, tournures et copeaux de métaux doivent parfois être libérés de l'huile et des liquides de coupe, ce qui peut être fait par séchage dans un four rotatif. L'exemple suivant décrit une installation de dégraissage des copeaux de titane utilisée dans la production du ferro-titane secondaire.

Composés organiques volatils [COV] détruits dans la post-combustion Les COV sont bien inférieurs au niveau autorisé de 20 mg/Nm³

Émissions dans l'eau : Aucune

Émissions dans les sols :

Les poussières de fumées résiduelles du procédé sont amenées dans un site de décharge autorisé. La quantité de poussières de fumées générée dépendra de la quantité et de la qualité des copeaux traités.

Données opérationnelles : L'usine dispose des utilités suivantes :

Gaz	la quantité de gaz consommée varie largement en fonction de la densité de la matière chargée et de la quantité d'huile contaminante et d'humidité présente. La consommation moyenne est typiquement de 374 m ³ /t de copeaux traitée.
Électricité	l'installation n'est pas régulée indépendamment. Cependant, on calcule que la consommation d'électricité est typiquement de 180 kWh/t de copeaux traitée.
Eau	Pas d'utilisation d'eau.

Effets croisés : La nature de l'opération est telle que les matières se libèrent dans l'air, plutôt que dans l'un des deux autres milieux environnementaux.

Dans la plupart des applications, l'industrie des métaux s'est généralement standardisée sur la base d'une installation de filtres à manche pour réguler les émissions atmosphériques. Cependant, pour cette application un filtre céramique a été choisi en raison de la température élevée du flux gazeux résiduel. Le filtre céramique offrirait également une bonne filtration avec l'impact environnemental le plus bas.

Des systèmes de lavage humide ont été envisagés, mais écartés. Une épuration de type humide tel qu'un laveur venturi générerait des déchets sous forme de boue dont on se débarrasserait plus difficilement et de manière plus coûteuse, et contiendrait une importante quantité d'eau. Le panache provenant de la cheminée principale serait également humide et pas aussi bien dispersé.

Aspects économiques : Coûts du projet

Le sécheur rotatif et la post-combustion ont été installés en 1993.

Le coût en 1998 serait de l'ordre de 0,607 M €

Cyclone, conduites, installation de filtration [filtre céramique] [installés en 1998] 0,410 M €

Estimation du coût global du projet 1,017 M €

Applicabilité : Usines nouvelles et existantes.

Documents de référence : [tm 162, London and Scandinavian Metallurgical Ltd, 1999]

9.3.3 Frittage

Comme déjà mentionné, une quantité importante de minerais et concentrés ne sont disponibles que sous forme de fines. Pour utiliser ces fines, certaines usines, en particulier celles destinées à la production du FeCr, utilisent des granulés (pellets) frittés comme matière première dans le four. La

raison principale dans le frittage des fines est d'obtenir une meilleure porosité du lit de fusion avec une pénétration et une élimination plus aisées des gaz générés par les réactions de réduction. Le frittage peut avoir lieu dans des fours de frittage à cuve, à grille ou à convoyeur en acier, où le four à convoyeur en acier fournit plusieurs avantages économiques et environnementaux.

EXEMPLE 9.03 FOUR DE FRITTAGE A CONVOYEUR EN ACIER

Description : Le four de frittage à convoyeur en acier est utilisé pour fripper les granulés de chromite dans la production du FeCr. Le four de frittage à convoyeur en acier est fermé. Les effluents gazeux provenant du four de frittage et des points où se forment les poussières peuvent être traités par un laveur humide basse pression ou un filtre à manches. Le fonctionnement du procédé est régulé par un système de régulation informatisé.

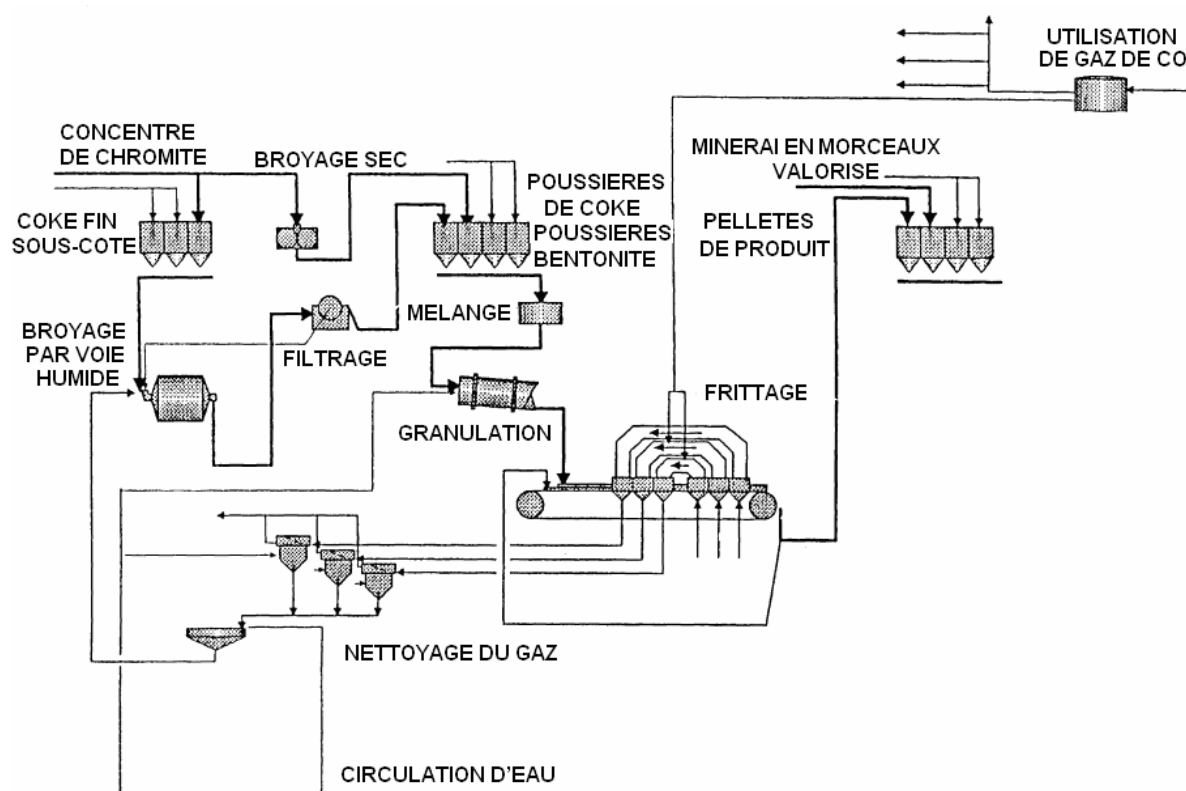


Figure 9.15 : Four de frittage à convoyeur en acier

Principaux bénéfices environnementaux : La consommation d'énergie externe dans un four de frittage à convoyeur en acier est inférieure à celle d'un four à cuve et à grille. Par conséquent, la génération de CO₂ et les émissions de SO₂ sont inférieures. La boue issue du traitement des effluents gazeux peut être recyclée dans l'étape de broyage par voie humide.

Données opérationnelles : La consommation d'énergie est de 700 - 1 400 MJ/t de granulés. Le CO provenant du four de fusion est utilisé comme combustible conjointement avec des fines de coke.

Niveaux d'émission pour les poussières :

Laveur humide $< 10 \text{ mg/Nm}^3$

Le laveur humide en cascade peut atteindre $< 4 \text{ mg/Nm}^3$

Filtre à manches $< 5 \text{ mg/Nm}^3$

Effets croisés : L'utilisation de CO gazeux comme combustible réduit l'énergie externe requise pour le procédé de frittage, ce qui entraîne moins de génération de CO₂, et réduit l'impact des gaz à effet de serre sur l'atmosphère si l'économie des sources d'énergie externe est prise en compte. Le laveur humide génère des eaux usées qui peuvent être recyclées dans l'étape de broyage par voie humide.

Aspects économiques : Non disponibles

Applicabilité : Toutes les usines nouvelles et existantes où des granulés frittés sont utilisées comme matière première pour le four. L'utilisation de CO comme combustible n'est possible que pour les usines utilisant un four fermé.

Documents de référence : [tm 141, Finlande 1998]

9.3.4 Pré-réduction et préchauffage

La pré-réduction du minerai de chromite et de manganèse réduit la consommation d'énergie électrique spécifique et augmente la productivité du four de fusion. Dans la production du FeCr, les fines de minerai de chromite sont pelletisées avec du coke en tant qu'agent réducteur et brûlées dans un four rotatif. Un brûleur alimenté par du charbon pulvérisé/CO/fuel chauffe le four. La chaleur résiduelle provenant du four est récupérée dans une chaudière de récupération pour générer de la vapeur d'eau. Les gaz émis sont traités dans un filtre à manches. Les granulés pré-réduits sont stockés dans un silo tampon complètement étanche conçu pour prévenir la ré-oxydation. Le matériau réduit est alors chargé à chaud dans le four, qui combine préchauffage et pré-réduction. Il a été rapporté que la technique de pré-réduction entièrement mise en œuvre et fonctionnant en continu dans une usine japonaise de ferrochrome réduit la consommation d'énergie jusqu'à environ 2 000 à 2 100 kWh/t de FeCr [tm 114, EnviroSence 1995]. La faiblesse d'un procédé de pré-réduction réside en la possibilité de formation d'accrétions dans le four. Il n'existe dans le monde que deux usines utilisant ce procédé de pré-réduction et une seule usine utilisant la technique de pré-réduction de Krupp-Codir (CDR).

La consommation d'électricité du four de fusion peut être réduite en préchauffant les matières chargées. Le préchauffage, par exemple tel qu'il est utilisé dans la production du FeCr, augmente en même temps la productivité du four de fusion.

EXEMPLE 9.04 PRECHAUFFAGE DANS UN FOUR A CUVE

Description : Le four de type à cuve est utilisé pour préchauffer le matériau de chargement pour la production du FeCr dans un four à arc électrique fermé. L'avantage du four de type à cuve est que le concassage du matériau de charge et la formation de poussières sont plus faibles. L'utilisation de l'énergie d'un combustible, par exemple du CO provenant du four de fusion ou de gaz naturel, est plus importante et le travail de maintenance nécessaire est réduit.

Principaux bénéfices environnementaux : Le préchauffage diminue la consommation d'énergie. En préchauffant la charge à 700 °C, l'humidité et une majeure partie des volatils peuvent être enlevés avant le chargement du matériau dans le four électrique. Ainsi la formation des gaz de réduction dans le four est stable.

Données opérationnelles : La consommation d'énergie électrique du four de fusion en aval est réduite de 70 à 90 kWh par augmentation de 100 °C de la température de préchauffage pour le four de fusion.

Effets croisés : L'utilisation de CO comme combustible réduit l'énergie électrique requise pour le procédé de fusion en aval. Son utilisation entraîne moins de génération de CO₂ et réduit l'impact des gaz à effet de serre dans l'atmosphère si les économies de production externe d'énergie électrique sont prises en compte. On a comparé un four vertical avec un four rotatif. La combustion du CO génère du CO₂.

Aspects économiques : Non disponible

Applicabilité : Toutes les usines nouvelles et existantes. L'utilisation du CO comme combustible n'est possible que pour les usines utilisant des fours fermés.

Documents de référence : [tm 143, EuroAlliages 1998]

9.3.5 Procédés de fusion

Dans la production des ferroalliages, l'étape la plus importante est la réduction des oxydes de métaux et de l'alliage avec le fer présent dans le procédé. En fonction de l'agent réducteur, différents types de systèmes de fusion (tels que le four à arc électrique, le haut fourneau ou un creuset de réaction) sont utilisés. Les fours à arc électrique fonctionnent normalement immergés de type fermé, semi-fermé ou ouvert. La conception des différents systèmes de fusion est influencée par la flexibilité souhaitée dans la production, la plage de matière première utilisée, les possibilités de récupération de l'énergie et la performance environnementale. Les différentes techniques considérées pour la récupération de l'énergie, qui sont très dépendantes du système de fusion utilisé mais également des conditions locales, y compris les prix de l'énergie disponible localement, les périodes de production et la présence de clients potentiels, seront discutées ultérieurement dans ce chapitre.

Les différents fours utilisés pour la production des ferroalliages ont été décrits précédemment dans le Chapitre 2 et sont listés dans le tableau suivant qui résume les avantages et les inconvénients des divers systèmes.

Système de fusion	Alliages produits	Collecte et dépollution des gaz	Avantages	Inconvénients
Four à arc immergé ouvert ayant trois électrodes	FeCr, FeMn, SiMn, FeSi, FeNi Métal de Si, récupération de l'alliage	Placés sous une hotte d'extraction de fumées et traités dans un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> • Conception simple, • Faible coût d'investissement et de maintenance, • Peut utiliser presque n'importe quelle matière première, • Une régulation du procédé de fusion peut facilement être obtenue, • Production d'eau chaude. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation d'énergie électrique élevée (filtre), • Aucune récupération de la chaleur, mis à part pour la production d'eau chaude, • Volumes importants des effluents gazeux, • Besoin de grands systèmes de régulation de la pollution, • Impact environnemental supérieur en raison du volume des effluents gazeux et de la chaleur fournie à l'air ambiant.
Four à arc immergé ouvert ayant une seule électrode	Ferroalliages spéciaux FeV, FeB	Placés sous une hotte d'extraction de fumées et traités dans un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> • Conception simple, flexibilité élevée de la production, • Faible coût d'investissement et de maintenance, • Peut utiliser presque n'importe quelle matière première, • Peut faire refondre les fines. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le four ouvert ayant une seule électrode est normalement utilisé dans la production d'alliages spéciaux pour de petites quantités. Les inconvénients mentionnés ci-dessus sont donc relativement inférieurs.
Four semi-fermé à arc immergé	FeCr, FeMn, SiMn, FeNi, FeSi Métal de Si Ferroalliages spéciaux	Placés sous une hotte d'extraction de fumées et traités dans un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> • Grande flexibilité dans l'utilisation des matières premières, • Récupération de l'énergie sous forme d'énergie électrique et/ou de vapeur d'eau, • Production d'eau chaude, • Moins d'effluents gazeux, installation de filtration plus petite, • Régulation aisée du procédé de fusion, • Impact environnemental réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation d'énergie relativement élevée, • Système plus complexe, • Coût de maintenance plus élevé, • Peut utiliser une quantité limitée de fines sans agglomération.
Four fermé à arc immergé	FeCr, FeMn, SiMn, FeNi, Ferroalliages spéciaux	Four étanche avec un laveur humide ou un filtre à média métallique en voie sèche	<ul style="list-style-type: none"> • Faible impact environnemental, • Récupération de l'énergie sous la forme d'un gaz riche en CO comme combustible secondaire, • Faible volume d'effluents gazeux, • Système assez simple. 	<ul style="list-style-type: none"> • Matières premières sous forme de morceaux bien classés ou agglomérées, • Les effluents gazeux sont constitués par du CO (explosif et toxique), • Système de traitement du gaz par voie humide, • Les eaux usées et la boue doivent être traitées ou réutilisées.
Four fermé à arc immergé avec préchauffage dans un four rotatif	FeCr	Four étanche avec un laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Faible consommation d'énergie électrique, • Efficacité énergétique, • Faible impact environnemental, • Augmentation de la capacité du four. 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin de quantités plus strictes de minerai ou de concentrés sous forme de morceaux compacts bien classés qui doivent être agglomérés, • Installation d'agglomération ou de granulation, • Coût d'investissement plus important, • Faible flexibilité dans les matières premières utilisées, • Système complexe, • Système de traitement du gaz par voie humide.
Four fermé à arc immergé ayant un four à cuve de préchauffage	FeCr	Four étanche avec un laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité plus grande dans l'utilisation de matière première, • Faible consommation d'énergie, • Récupération de l'énergie, • Faible impact environnemental, • Productivité du four accrue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un minerai sous forme de morceaux compacts ou de la matière première agglomérée bien classés, • Système de traitement du gaz par voie humide.
Four fermé à arc	FeCr	Four étanche avec un	<ul style="list-style-type: none"> • Très faible consommation d'énergie électrique, 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement supérieur,

Système de fusion	Alliages produits	Collecte et dépollution des gaz	Avantages	Inconvénients
immergé avec une pré-réduction dans un four rotatif		laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Récupération de la chaleur, utilisation de la totalité des effluents gazeux, Consommation supérieure en charbon, consommation inférieure en coke, Productivité du four accrue. 	<ul style="list-style-type: none"> Système de traitement du gaz par voie humide, Système très complexe, Aucune flexibilité dans les matières premières utilisées, Coût de maintenance relativement élevé, Possibilité de formation d'accrétions.
SKF Plasmachrome	FeCr	Four étanche	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'utiliser n'importe quel minerai, Utilisation des fines sans agglomération, Récupération de l'énergie, Utilisation de charbon à la place du coke. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût d'investissement supérieur, Consommation d'énergie élevée, Système complexe, Durée de fonctionnement inférieure, CO dans un système pressurisé.
Four C.C. ASEA	FeCr	Four étanche	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de fines sans agglomération, Faible coût d'investissement, Densité supérieure d'énergie, 	<ul style="list-style-type: none"> Injection avec des difficultés inconnues, Problèmes avec l'électrode de sole quand elle est surchauffée, Besoin d'électrodes précuites,
Haut fourneau	HC FeMn	Four fermé	<ul style="list-style-type: none"> Capacité de production élevée, Effluents gazeux ayant une valeur calorifique élevée, Récupération de l'énergie, utilisation de la totalité de l'énergie des effluents gazeux. 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation très élevée de coke, Laveur humide, Coût d'investissement élevé, Installation complexe.
Creuset à garnissage réfractaire	Alliages spéciaux, FeMo	Placé sous une hotte d'extraction de fumées et un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> Faible coût d'investissement, Haute flexibilité de la production. 	<ul style="list-style-type: none"> Volume plus important des effluents gazeux, Système de collecte des gaz moins efficace.
		Enfermé dans une chambre à réaction connectée à un filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> Faible coût d'investissement, Haute flexibilité de la production, Système efficace de collecte des fumées, Moindre volume des effluents gazeux. 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'investissement légèrement supérieurs.
Four de grillage à soles multiples	Grillage de la molybdénite	Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Technologie ayant fait ses preuves, De l'acide sulfurique peut être produit. 	

Tableau 9.21 : Résumé des avantages et inconvénients des systèmes de fusion utilisés dans l'industrie des ferroalliages.

En tenant compte des avantages et inconvénients ci-dessus, les systèmes de fusion à prendre en compte sont :

- Un four ouvert pour les applications spéciales et les petites capacités connectées à un filtre à manches ;
- Un four semi-fermé connecté à un filtre à manches ;
- Des systèmes de fours fermés pour différentes applications traitées par un laveur humide ou un système de traitement par voie sèche ;
- Un haut fourneau si l'énergie perdue est récupérée ;
- Des creusets de réaction ayant un système de hottes d'extraction de fumées approprié connecté à un filtre à manches ;
- Des creusets de réaction dans une chambre fermée connectée à un filtre à manches ;
- Un four de grillage à soles multiples pour le grillage de la molybdénite avec une élimination des poussières et une récupération des acides.

Le four ouvert pour la production des ferroalliages courants n'est pas une technique à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Les raisons principales sont la consommation plus élevée d'énergie électrique due au volume plus important des effluents gazeux devant être traités dans le dispositif de filtration. Ce volume plus important des effluents gazeux induit, même avec un filtre à manches de haute efficacité, une quantité plus importante de poussières fines émises dans l'environnement. De plus, l'énergie utilisée pour faire fonctionner un four ouvert ne peut pas être récupérée.

9.3.6 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques utilisées pour la collecte des fumées et la dépollution discutées dans le Chapitre 2 de ce document sont les techniques à prendre en compte pour la production des ferroalliages. Le filtre à manches et les laveurs humides sont normalement utilisés pour le dépoussiérage des gaz émis par le procédé.

Il existe une grande variété de modèles de filtres à manches utilisant différents types de matériaux de filtration, qui en principe donnent tous de faibles valeurs d'émissions, c'est-à-dire des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm^3 . L'utilisation des techniques de filtration par membrane (filtration superficielle) donne de plus une vie de la manche accrue, une tenue thermique élevée (jusqu'à 260°C) et des coûts de maintenance relativement faibles combinés à des émissions de poussières dans la plage de 1 à 5 mg/Nm^3 . Il existe différents fournisseurs en Europe capables de fournir un filtre à manches ayant des manches de type membrane. Les manches de filtres à membrane sont constitués par une membrane ultra-fine en PTFE expansé, laminée sur un matériau de support. Les particules émises par le procédé sont captées sur la surface de la manche. Plutôt que de former un gâteau à l'intérieur du tissu de la manche ou pénétrant dans celui-ci, les particules sont repoussées de la membrane, formant ainsi un gâteau plus petit. Cette technique est applicable à toutes les usines nouvelles et existantes et peuvent également être utilisées pour la réhabilitation des filtres à manches existants [tm 144, Elkem 1998].

Dans l'industrie des ferroalliages et de la métallurgie, les filtres à manches sont dans de nombreux cas des filtres pressurisés avec des ventilateurs du côté fumées/gaz sales. Les récents développements ont abouti à un filtre à aspiration en circuit fermé avec des ventilateurs du côté gaz propres.

Celui-ci combine les avantages d'un décolmatage en douceur de la manche, ce qui implique une vie plus longue de la manche, des coûts de fonctionnement et de maintenance bas et en raison du filtre fermé, un volume de gaz défini [tm 144, Elkem 1998].

Dans le cas des ferroalliages récupérés à partir des résidus d'aciérie, le traitement des effluents gazeux est effectué dans un filtre à manches en deux étapes. Dans la première étape, les poussières du four

sont collectées pour être recyclées ou dirigées vers un procédé ultérieur. Dans la seconde étape, des granules d'absorbant (charbon actif ou coke de lignite) sont injectés. Les métaux volatils, notamment le mercure et dans une moindre mesure le cadmium et le plomb, sont chimisorbés à la surface du carbone. En raison de la nature hautement toxique du mercure et du cadmium, des émissions de ces métaux inférieures à $0,2 \text{ mg/Nm}^3$ peuvent être atteintes. L'absorbant piège également les composés chlorés, y compris la dioxine. En variante, un laveur venturi à 3 étages combiné à un électrofiltre humide et à un filtre de sélénium peut être utilisé. Le filtre de sélénium retire le mercure des effluents gazeux.

Les laveurs humides sont des techniques à prendre en compte lorsqu'on utilise des fours fermés où les effluents gazeux riches en CO ont besoin d'être lavés et dépoussiérés à des températures très élevées. Les laveurs humides modernes atteignent des émissions de poussières inférieures à 10 mg/Nm^3 , avec des poussières plus grosses, et des concentrations de poussières de 4 mg/Nm^3 atteintes en utilisant un laveur en cascade pour nettoyer les effluents gazeux provenant d'un four de frittage ont même été rapportées [tm 200, Kantola, 1999]. Les laveurs venturi utilisés pour nettoyer les effluents gazeux provenant d'un four à HC FeCr fermé atteignent des émissions inférieures à 50 mg/Nm^3 en raison des très fines poussières qui sont produites dans le four, mais qui ne sont pas directement émises dans l'atmosphère. Les inconvénients du laveur humide sont généralement les suivants : les émissions de poussières sont légèrement supérieures et le liquide de lavage et la boue nécessitent un traitement supplémentaire. En comparaison avec un filtre à manches qui est normalement utilisé pour un four semi-fermé, le laveur humide, même s'il génère des émissions de poussières plus élevées, n'entraîne pas d'impact environnemental supérieur en raison du volume réduit des effluents gazeux provenant d'un four fermé. Un seul cas a été rapporté où un four à ferroalliage fermé est muni d'un filtre à manches métalliques à la place d'un système d'épuration par voie humide. Ce filtre récupère la chaleur des gaz émis et élimine la nécessité d'une unité de lavage. Les poussières collectées sont pelletisées et le gaz traité est brûlé dans une chaudière [tm 202, EnviroSense, 1995].

Le gaz émis par le four de grillage de molybdénite contient des quantités importantes de poussières qui sont éliminées par des multicyclones en combinaison avec un filtre électrostatique en voie sèche. Les poussières collectées sont recyclées dans la charge contenant le concentré. Le gaz contient également jusqu'à 2,5 % de dioxyde de soufre, de petites quantités d'hydrocarbures imbrûlés et de trioxyde de soufre et une certaine quantité de métaux hautement volatils. Pour éliminer ces polluants après dépoussiérage, le gaz est lavé et refroidi dans des laveurs humides afin de produire un gaz de dioxyde de soufre propre qui peut être converti en acide sulfurique concentré. Il faut prendre en compte les techniques discutées dans le Chapitre 2 en liaison avec ce procédé. L'acide produit pendant le procédé peut être stocké dans des réservoirs à double paroi placés dans des enceintes de protection résistantes aux produits chimiques ou des réservoirs à paroi unique à l'intérieur de zones de confinement qui peuvent contenir la totalité de la (des) cuve(s) de stockage.

L'utilisation de hottes pour la vidange et la coulée est également une technique à considérer. Les fumées émises lors de la vidange seront constituées par les fumées venant des lances à oxygène et du perçage, les fumées provenant des débouchure vaporisés si un pistolet à piquée est utilisé et les fumées provenant de toutes les surfaces exposées de métal et de laitier. Ces fumées seront principalement constituées par les oxydes des métaux qui sont impliqués dans le procédé de fusion. La conception du système de hottes d'extraction de fumée doit tenir compte de l'accès pour le chargement et des autres opérations du four et de la manière dont la source des gaz du procédé change pendant le cycle du procédé.

EXEMPLE 9.05 SYSTEME DE HOTTES D'EXTRACTION DE FUMÉES POUR LA COLLECTE DES FUMÉES ISSUES DE LA VIDANGE ET DE LA COULÉE PROVENANT D'UN FOUR A ARC ELECTRIQUE

Description : La conception des systèmes de hottes d'extraction de fumée appropriés pour collecter les fumées provenant des zones de vidange et de coulée est très dépendant de la situation spécifique au site des agencements de la vidange et de la coulée. Un grand nombre de différents modèles de hottes d'extraction de fumées existe donc. L'équipement de traitement, qui est de nos jours normalement utilisé pour les fumées venant de la vidange, est un filtre à manches. Il peut s'agir d'un filtre distinct ou d'un filtre qui nettoie également les fumées issues de la coulée des métaux ou les effluents gazeux du four. Un exemple de système de hottes d'extraction de fumées utilisé pour la collecte des fumées émises lors de la vidange et de la coulée est montré ci-dessous.

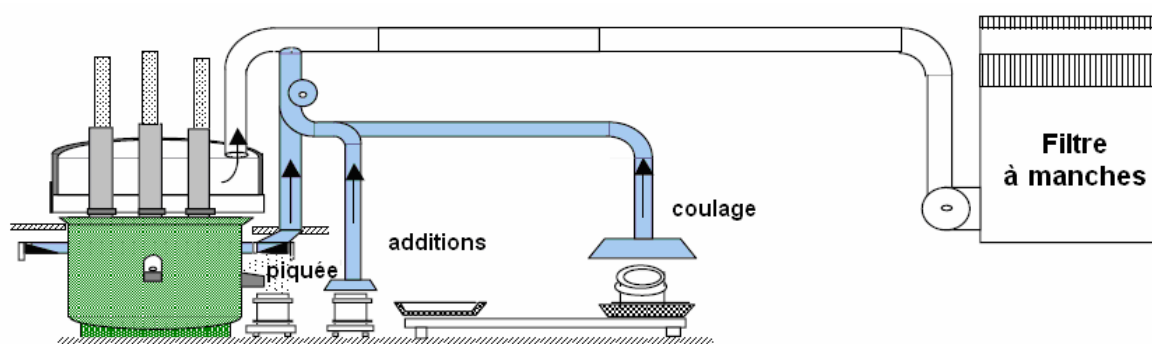


Figure 9.16 : Collecte des fumées émises lors de la vidange et de la coulée

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction des émissions fugitives provenant de la zone de vidange et de coulée. Minimisation des fumées, des poussières et de la fumée non régulés qui quittent le bâtiment où se trouve le four avec l'air de ventilation. Le filtre à manches peut atteindre des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm^3 .

Données opérationnelles : L'échantillonnage de l'air de ventilation quittant le bâtiment où se trouve le four, y compris la zone de vidange et de coulée, sur de longues durées, peut donner une indication des valeurs moyennes. Ces valeurs montrent des concentrations moyennes en poussières entre 5 et 12 mg/Nm^3 et des émissions totales de poussières atteignant de 0,2 à 0,6 kg/tonne d'alliage produit. Cette quantité de poussières peut être sensiblement réduite.

Effets croisés : La réduction des émissions fugitives dans un bâtiment où se trouve le four entraîne également de meilleures conditions de travail. La mise en place de l'évacuation et du traitement des gaz requiert une consommation d'énergie supplémentaire en raison de l'utilisation de ventilateurs puissants.

Aspects économiques : Non disponibles

Applicabilité : Toutes les usines nouvelles et existantes.

Documents de référence : [tm 143, EuroAlliages 1998]

EXEMPLE 9.06 SYSTÈME DE HOTTES D'EXTRACTION DE FUMÉE POUR LE DEPOUSSIERAGE DES TROUS DE COULÉE ET DES CHENAUX DE COULÉE D'UN HAUT FOURNEAU PRODUISANT DU HC FEMn

Description : L'équipement de dépoussiérage est composé de diverses hottes situées au-dessus du trou de coulée du haut fourneau, le chenal de coulée de métal principal et le dispositif où le métal liquide est versé dans la poche-torpille. Les fumées collectées sont traitées dans un filtre à manche distinct. Le système de hottes d'extraction des fumées (vue du dessus du haut fourneau) est montré sur la figure suivante.

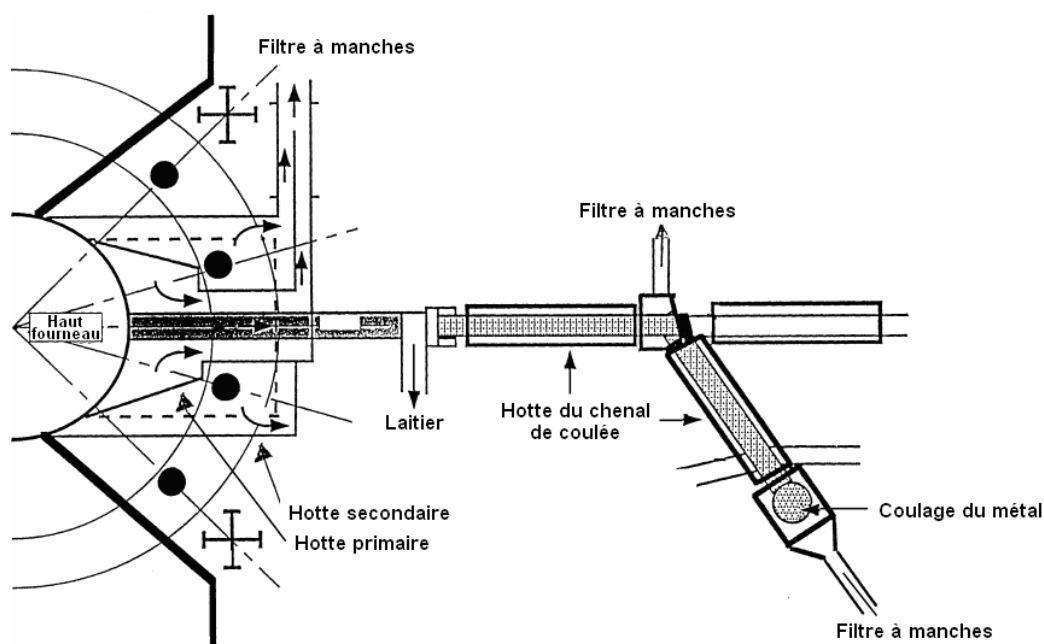


Figure 9.17 : Système de hottes d'extraction des fumées pour un haut fourneau

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction des émissions fugitives provenant de la zone de vidange et de coulée. Minimisation des fumées, des poussières et de la fumée non régulés qui quittent le bâtiment où se trouve le four avec l'air de ventilation.

Données opérationnelles : Efficacité de la collecte ;

Hotte principale	96 %
Hotte correspondant à la coulée de métal en poche	86 %
Hotte du chenal de coulée	100 %
Débit	310 000 m ³ /h
Émissions de poussières mesurées après dépollution (filtre à manches)	< 5 mg/Nm ³

Effets croisés : La réduction des émissions fugitives dans un bâtiment où se trouve le four entraîne également de meilleures conditions de travail. La mise en place de l'évacuation et du traitement des gaz requiert une consommation d'énergie supplémentaire en raison de l'utilisation de ventilateurs puissants

Aspects économiques : Le coût d'investissement est d'environ 1,0 M €

Applicabilité : Applicable à tous les hauts fourneaux nouveaux et existants.

Documents de référence : [tm 195, SFPO 1999]

9.3.7 Régulation du procédé

Les principes de régulation du procédé discutés dans le Chapitre 2 sont applicables aux procédés de production utilisés dans ce groupe. Certains des fours et procédés sont capables d'être améliorés grâce à l'adoption de plusieurs de ces techniques. Des systèmes de régulation informatisés sont par exemple utilisés dans la production de FeSi et de métal de Si afin de suivre et de réguler la génération des fumées de silice.

9.3.8 Opérations en aval du four

L'utilisation d'une foreuse pneumatique ou hydraulique ouvre normalement le trou de coulée du four de fusion. Des lances à oxygène sont également utilisées, soit comme méthode unique soit comme appui ou complément au perçage. Un pistolet à piquée aide à enlever les blocages, mais les débouchures contenant du plomb et du zinc ne doivent être utilisés que si une hotte appropriée est installée pour enlever les fumées provenant des vidanges. Cela est nécessaire parce que le plomb et en particulier le zinc, seront dans une large mesure vaporisés dans le trou de coulée, et créeront des fumées de zinc et de plomb qui sinon pollueraient la zone de travail et intégreraient ensuite l'air de ventilation. Le trou de coulée est fermé en utilisant une machine à boucher.

La technique de vidange la plus couramment utilisée est la vidange en cascade. Dans ce cas, le métal et le laitier sont recueillis ensemble dans la même cuve. Le laitier de densité inférieure flotte au dessus et finit par déborder par le bec dans la poche suivante.

La granulation du laitier et la pulvérisation d'eau du laitier dans un puits ou une station de coulée contribueront à réduire les émissions de fumées et de poussières. L'eau usée nécessite un traitement dans un décanteur pour éliminer les particules avant de l'utiliser de nouveau comme eau de trempe.

La génération d'une poudre très fine (poussières) qui est collectée dans le filtre à manches utilisé pour le dépoussiérage des effluents gazeux du four peut créer des problèmes de manutention, de stockage et de transport des poudres.

EXEMPLE 9.07 DENSIFICATION DE LA POUDRE DE SILICE ET AUTRES POUSSIÈRES COLLECTÉES DANS LES FILTRES A MANCHES PROVENANT DES FOURS DE FUSION DE FERROALLIAGES

Description : Pour manipuler la fumée de silice (microsilice) et les autres poussières sous filtre de ferroalliage, un procédé de densification impliquant une étape de micro-granulation a été rapporté. Le procédé qui transforme une poudre en petites sphères d'environ 0,5 à 1 mm de diamètre.

Principaux bénéfices environnementaux : -La densité apparente plus importante réduit l'impact environnemental du transport, ce qui implique moins de pollution de l'air et moins de nuisances sonores provenant du trafic de camions.

Données opérationnelles : La densité apparente des poussières de silice brute est inférieure à 0,2 t/Nm³. Le procédé de micro-granulation augmente la densité apparente jusqu'à 0,5 à 0,6 t/Nm³. Ceci réduit les coûts de transport d'environ 65 % et l'impact environnemental du transport.

Effets croisés : Moins de trafic de camions

Aspects économiques : Non disponibles

Applicabilité : Les usines nouvelles et existantes où l'on doit manipuler de la fumée de silice, de la poudre de SiMn, de la poudre de FeCr, des oxydes de manganèse et de fer.

Documents de référence : [tm 144, Elkem 1998].

9.3.9 Traitement de l'eau

Les systèmes de traitement existants sont rapportés comme étant de haute technicité. Au besoin, il faut traiter les eaux usées pour éliminer les métaux dissous et les solides. Les techniques listées dans le Chapitre 2 sont les techniques à prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées comprenant l'eau de pluie sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

Un traitement de l'eau est nécessaire dans les procédés utilisant des laveurs humides et les procédés de granulation, parce qu'il faut éliminer les solides en suspension avant que l'eau ne soit remise en circulation. Pour obtenir des valeurs acceptables de composés nocifs, il peut dans certains cas être nécessaire de traiter davantage la purge qui doit être prélevée à partir du cycle de l'eau de lavage. Pour se faire, on peut utiliser des filtres à sable, des filtres à carbone ou ajouter des produits chimiques adéquats pour faire précipiter les composés nocifs.

9.3.10 Réduction des résidus du procédé

Les procédés et les voies de recyclage qui ont été discutés précédemment en tant que méthodes appliquées dans la section sur les niveaux actuels d'émission et de consommation représentent tous des mesures à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Le facteur le plus important pour réduire l'impact environnemental des résidus à éliminer en tant que déchets est représenté par les mesures intégrées au procédé qui entraînent la génération de résidus en moindre quantité. Si la quantité de résidus du procédé est minimisée en utilisant des mesures primaires, il faut recycler ou réutiliser les résidus restant autant que possible. Les matières chargées spécifiques influenceront le choix du procédé final. Il faut également considérer les techniques discutées dans le Chapitre 2 en liaison avec ces procédés.

9.3.11 Techniques visant à réduire la consommation globale d'énergie

Comme déjà mentionné, en présentant la consommation totale d'énergie brute dans la Partie 9.2.1 de ce chapitre, la production de ferroalliages est un procédé consommateur d'énergie. Pour les procédés

relatifs au laitier produisant du HCFer ou du HCFerMn dans des fours fermés, la consommation de coke pour le procédé de fusion lui-même se situe dans la plage de 420 à 520 kg/tonne. La pré-réduction du minerai peut être réalisée en utilisant du charbon ou d'autres matériaux à base de carbone bon marché, tous deux comme source d'énergie et comme agent réducteur. Ceci permettra d'abaisser à la fois la quantité de coke et d'énergie électrique dans le four de réduction, mais pourrait augmenter la consommation totale de matières carbonées et la consommation d'énergie brute du procédé dans son ensemble.

Si l'on fait l'hypothèse que la totalité de ce carbone est convertie en CO, à savoir aucune réduction par le CO gazeux et pas de carbone perdu, le carbone peut théoriquement être récupéré sous forme de CO gazeux. Celui-ci peut alors être utilisé comme combustible en tant que récupération d'énergie, soit par combustion au-dessus d'un four semi-fermé, soit par collecte à partir d'un four fermé et utilisation ultérieure. La quantité serait par exemple entre 770 et 1 050 kg CO/tonne de FeCr. Ceci serait équivalent à une valeur comprise entre 2 160 et 2 950 kWh/tonne. En réalité ces chiffres seraient probablement inférieurs de 5 à 15 %. La quantité résultante de CO₂ produite par le procédé de fusion seul atteindrait de 1 200 à 1 650 kg/tonne.

Par exemple dans une usine de FeCr norvégienne, le bilan entre la récupération du CO et son utilisation en 1998 a été rapporté comme suit :

Récupération et utilisation de l'énergie	Énergie kWh/t
Énergie récupérable totale :	2 090
Énergie récupérée totale, y compris utilisation interne 190 kWh/t (frittage, séchage du coke, chauffage de la poche) :	1 460
Brûlé à la torche :	630

Tableau 9.22 : Énergie récupérable et récupérée totale

L'énergie récupérable dans ce cas n'est pas un chiffre théorique, mais correspond au CO gazeux récupéré et utilisé de façon interne et externe plus le gaz en excès brûlé à la torche. Le bilan énergétique total pour l'ensemble de l'usine était comme suit :

Consommation et récupération d'énergie	Énergie kWh/t
Énergie électrique :	4 060
Énergie potentielle dans le coke :	4 430
CO récupéré, y compris utilisation d'énergie interne 190 kWh/t	1 460
Consommation d'énergie totale de l'usine :	7 220

Tableau 9.23 : Bilan énergétique total pour un four de fusion de FeCr

Un bilan similaire pour les autres voies de procédé ne peut pas être obtenu en raison du manque d'informations suffisamment détaillées. Cependant, un bilan approximatif peut être obtenu, qui comprend seulement les chiffres de consommation d'énergie du « combustible » ou du « procédé », à savoir l'énergie électrique et le coke et le gaz utilisés comme combustibles, comme montré dans le tableau ci-dessous. Il ne comporte pas de comparaison entre la consommation d'agent réducteur et les efficacités de la récupération de l'énergie du CO.

Source d'énergie	Procédé conventionnel (1) kWh/t	Procédé conventionnel, four de frittage fermé kWh/t	Procédé, four fermé et granulation/frittage préchauffage (3) kWh/t
Électricité	3 800 - 4 500	4 060	3 100 - 3 500
Frittage	0	880 (2)	0
Granulation /	0	0	275 - 500 (3)

frittage			
Préchauffage	0	0	500 - 700 (4)
Autre	0- 2 700 (5)	190	100 - 200
Total	3 800 - 7 200	5 130	3 975 - 4 900
Notes :			
(N 1)	Four conventionnel ouvert, semi-fermé ou fermé avec un minerai en morceaux et/ou des briquettes/fines		
(N 2)	Energie issue du poussier de coke utilisé dans le procédé de frittage		
(N 3)	En faisant l'hypothèse que 60 % du minerai sont représentés par des granulés		
(N 4)	Préchauffage jusqu'à 700 °C		

Tableau 9.24 : Comparaison de la consommation d'énergie électrique et de combustible

Ce tableau indique que la différence de consommation d'énergie du procédé entre les différents modes de production n'est pas très importante. En effet, les voies de procédé « conventionnel » peuvent avoir un avantage si une partie considérable de l'énergie récupérable peut être vendue à l'extérieur. Le plus souvent, les usines n'ont pas de clients extérieurs consommateurs d'énergie. Choisir une voie de procédé qui puisse utiliser la chaleur récupérée, soit pour des étapes supplémentaires du procédé qui augmentent l'efficacité et la production, soit pour la génération d'électricité, constitue donc une option conseillée.

Un point important du procédé utilisant un four fermé qui utilise une granulation/frittage et un préchauffage est de minimiser l'utilisation de carbone fossile par tonne d'alliage produit, ce qui permet également de minimiser les émissions spécifiques de CO₂. Cependant, la granulation/frittage ne réduira l'impact des gaz à effet de serre que si un autre procédé moins efficace énergétiquement entraîne une diminution du CO.

La qualité du minerai est également un facteur important pour la consommation d'énergie. D'importance primordiale, on peut citer la teneur en oxyde de métal et le rapport métaux non ferreux/fer, qui doivent tous deux être aussi élevés que possible. D'importance secondaire, on peut citer la teneur en minéraux de la gangue qui doit être aussi faible que possible dans le minerai ou le mélange de minerais (ceci sera partiellement une conséquence d'une quantité élevée d'oxyde de métal), et d'une composition adéquate pour minimiser l'utilisation des additifs de laitier. Ceci réduira la quantité de laitier, et ainsi la proportion de l'énergie électrique nécessaire pour faire fondre le laitier.

En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie, l'inconvénient des fours de fusion utilisés sans récupération de l'énergie est la quantité élevée de perte d'énergie sous forme de CO dans les effluents gazeux et sous forme de chaleur résiduelle. Par exemple, lors de la production du FeSi et du métal de silicium, seuls environ 32 % de l'énergie consommée représentent de l'énergie chimique dans le produit, ce qui signifie qu'environ 68 % de l'énergie sont perdus sous forme de chaleur dans les effluents gazeux du four [tm 152, A. Schei, J.K.Tuset, H. Tveit, 1998]. L'énergie peut être récupérée à partir des cycles de refroidissement sous forme d'eau chaude et à partir des effluents gazeux sous forme de chaleur qui peut être transformée en vapeur d'eau à haute pression et ensuite transformée en énergie électrique ou en utilisant directement le CO comme combustible secondaire.

Il existe certaines améliorations directes des usines qui peuvent être faites pour réduire la consommation d'énergie, telles que la mise en œuvre du procédé avec un rendement de production de métal élevé, l'amélioration de la conception du four pour obtenir une perte d'énergie moindre. En plus des améliorations directes des usines, environ de 15 à 20 % de l'énergie électrique consommée par le four à arc électrique peuvent être récupérés sous forme d'électricité par un système de récupération de l'énergie. Ce pourcentage est considérablement plus élevé pour un système qui produit de l'électricité et utilise l'énergie thermique du refroidissement du four et le volume d'effluents gazeux. Ce peut être le cas si le CO est utilisé directement comme combustible secondaire afin de remplacer les combustibles fossiles. Les exemples suivants montrent les possibilités de récupération de l'énergie des différents types de fours utilisés dans l'industrie des ferroalliages.

EXEMPLE 9.08 RECUPERATION DE L'ENERGIE ET UTILISATION DU CO PROVENANT D'UN FOUR A ARC ELECTRIQUE FERME

Description : La partie principale du procédé est un four à arc électrique fermé, qui génère des effluents gazeux riches en CO (de 70 à 90 % de CO). Les effluents gazeux sont traités en utilisant un laveur humide avant de pouvoir être utilisés comme combustible secondaire. Une possibilité est la combustion avec de l'air dans un générateur à vapeur. La vapeur d'eau est amenée dans un ensemble de turbines haute pression et basse pression. L'énergie est alors récupérée sous forme d'électricité.

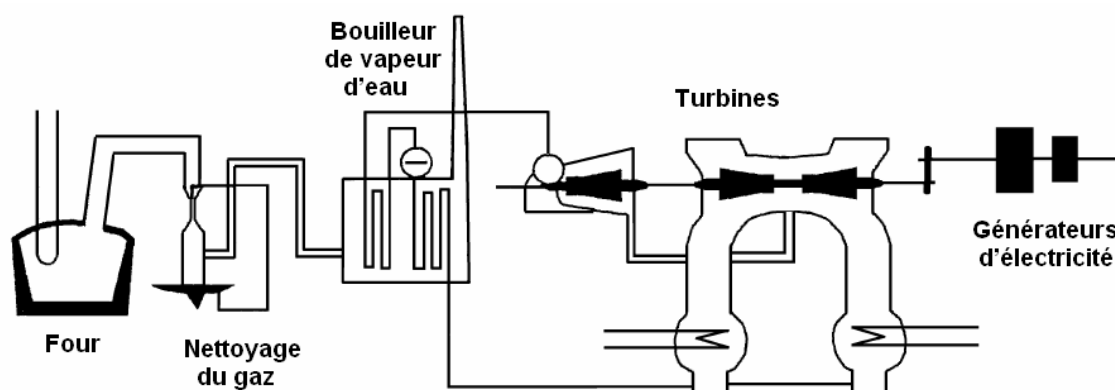


Figure 9.18 : Utilisation directe du CO pour la production d'énergie électrique

Principaux bénéfices environnementaux : La récupération de l'énergie électrique issue du CO réduit la consommation globale d'énergie du procédé, ce qui minimise par conséquent l'impact du réchauffement climatique par émission de CO₂ par combustion de combustible fossile.

Données opérationnelles :

Vapeur d'eau produite de 35 à 40 tonnes/h

Récupération de l'énergie 70 GWh/a = 13,5 % de l'énergie électrique en entrée

Effets croisés : L'énergie récupérée remplace dans la plupart des cas le combustible fossile tel que le fuel ou le charbon et réduit donc en même temps les émissions de SO₂

Aspects économiques : Une indication du coût est d'environ 0,025 € par kWh (taux d'intérêt réel de 7 % et durée de vie 15 ans)

Applicabilité : Les usines nouvelles et existantes produisant du FeCr, du FeMn et du SiMn dans des fours fermés

Documents de référence :

[tm 151, Récupération de l'énergie dans l'industrie norvégienne des ferroalliages, 1995]

[tm 157, 10^{ème} Conférence internationale sur les ferroalliages, 1994]

En plus de la production d'électricité, le CO peut également être transféré au moyen de conduites sur le site de l'usine et être utilisé comme combustible secondaire à de nombreuses fins. Les meilleures applications sont obtenues par une combustion directe en remplacement de combustibles fossiles, par exemple le fuel lourd ou le charbon. Dans la production du FeCr, du FeMn et du SiMn, du CO peut être utilisé pour le séchage du coke et autres matières premières. Le CO peut également être utilisé comme combustible dans le four de frittage à convoyeur en acier afin de réduire la consommation d'énergie primaire du four. Dans la production du FeCr, le CO est utilisé pour préchauffer le matériau de charge, ce qui réduit la consommation d'énergie électrique de 70 à 90 kWh par augmentation de

100 °C de la température de préchauffage. Il peut également être utilisé dans une usine d'acier inoxydable adjacente. [tm 141, Finlande 1998]

Le gaz riche en CO peut également être traité puis fourni comme gaz de synthèse à une usine de produits chimiques voisine, dans laquelle le gaz sert de matière première.

Dans un four semi-fermé, le CO gazeux provenant du four de fusion brûle dans l'air d'extraction, créant ainsi des effluents gazeux chauds d'environ 400 à 800 °C qui peuvent également atteindre des pics allant jusqu'à 1 200 °C. Les fours peuvent être équipés d'un système de récupération de l'énergie intégré, qui contient les composants suivants :

- Hotte d'extraction avec conduites venant du four,
- Chaudière de récupération,
- Système d'eau d'alimentation,
- Système de distribution de la chaleur ou turbine à vapeur avec un générateur et un condensateur.

EXEMPLE 9.09 RECUPERATION DE L'ENERGIE POUR UN FOUR A ARC ELECTRIQUE SEMI-FERME

Description : L'énergie contenue dans les effluents gazeux chauds du four peut être récupérée dans une chaudière de récupération, qui produit de la vapeur d'eau surchauffée. Des chaudières comportant des conduites d'eau relativement conventionnelles et des sections de surchauffeur, d'économiseur et de condenseur sont utilisés, combinés à un système de traitement efficace pour maintenir propres les surfaces chauffantes qui sont au contact des gaz fortement empoussiérés.

La hotte située au sommet du four est hautement exposée à la chaleur interne du four, et est conventionnellement refroidie avec un système de canalisations d'eau recouvert d'un garnissage en céramique. Environ 25 % des émissions de chaleur du four sont perdus dans l'eau de refroidissement de la hotte. Pour la récupération de l'énergie, la hotte peut être refroidie par des canalisations d'eau à haute pression non blindées, produisant de la vapeur d'eau dans la chaudière de récupération. Une telle hotte existe et contribue sensiblement à la récupération de l'énergie.

La vapeur d'eau peut être utilisée dans une turbine à contre pression afin de produire de l'électricité ou être vendue à une usine voisine. Le système de récupération peut également être conçu pour produire de l'eau chaude, qui peut être utilisée par un système de chauffage local.

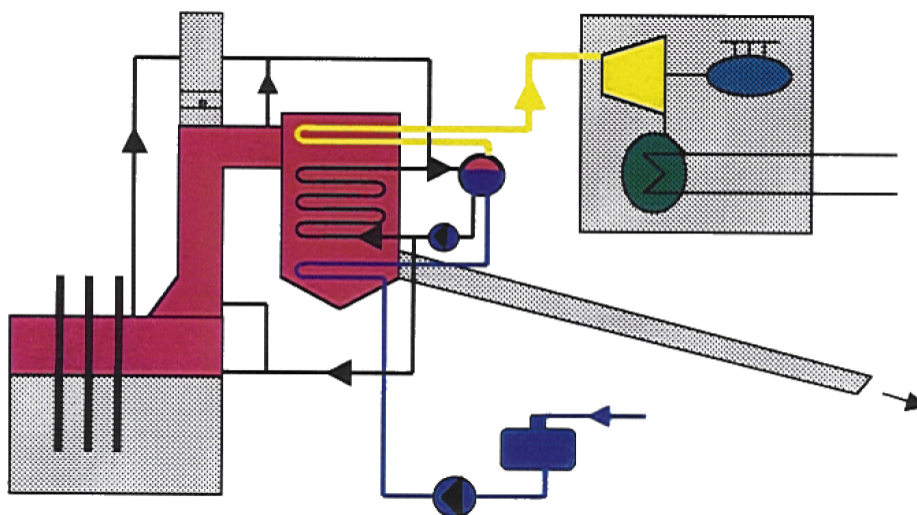


Figure 9.19 : Récupération de l'énergie à partir d'un four semi-fermé

Principaux bénéfices environnementaux : La récupération de l'énergie à partir d'effluents gazeux chauds réduit la consommation globale d'énergie du procédé, ce qui minimise l'impact du réchauffement climatique par les émissions de CO₂ dues à la combustion des combustibles fossiles. L'énergie des effluents gazeux présentait une source d'énergie considérable, disponible et partiellement inexploitée, qui peut fournir de l'électricité nouvelle sans pollution ni émission supplémentaire de CO₂.

Données opérationnelles : L'énergie des effluents gazeux peut être utilisée pour produire de l'énergie électrique, de l'énergie thermique ou les deux. Si la chaleur résiduelle est utilisée comme énergie électrique, la récupération représente jusqu'à 28 à 33 % de la consommation d'énergie. Dans d'autres cas, la vapeur d'eau peut être drainée à la pression moyenne et être utilisée pour le chauffage collectif, et la récupération augmentera jusqu'à environ 80 à 90 %. Mais alors seulement 20 % de la chaleur résiduelle sont récupérés sous forme d'énergie électrique. La demande en chauffage collectif varie souvent au cours de l'année et la solution la plus efficace est la co-génération d'énergie électrique et d'énergie thermique pour fournir de l'énergie thermique seulement lorsque nécessaire.

Effets croisés : L'énergie récupérée remplace dans la plupart des cas un combustible fossile tel que le fuel ou le charbon et réduit donc en même temps les émissions de SO₂. La récupération de l'énergie ne produit pas de pollution, puisque la composition du gaz émis n'est pas modifiée par la récupération.

L'émission d'air de refroidissement chaud et d'eau chaude provenant de l'usine est réduite. La récupération de l'énergie ne crée aucun changement visuel du paysage.

Aspects économiques : Il y a deux cas d'étude économiques qui ont été rapportés. Il convient de considérer les résultats suivants comme une indication du coût parce que les données sur le coût exact sont très dépendantes des circonstances spécifiques de l'usine.

Premier cas :

Une usine avec 3 fours et une consommation totale d'énergie électrique d'environ 117 MW a été prise en compte. Les fours sont équipés de hottes de type conventionnel. L'énergie électrique récupérée nette sera de 317,6 GWh/a, ce qui équivaut à 32,9 % de la consommation d'énergie. L'amortissement pour l'investissement de 43,1 M € sur 15 ans à un taux d'intérêt de 7 % entraîne un coût d'immobilisation du capital de 4,73 M €/a. Le coût de l'électricité est d'environ 0,016 à 0,017 €/kWh.

Coût d'immobilisation du capital	4,73 M €
Main d'œuvre (5,5 hommes.an)	0,25 M €
Total	5,76 M €

Second cas :

La production du FeSi avec une consommation d'électricité de 60 MW utilise un four semi-fermé avec une température d'effluents gazeux d'environ 750 °C. La chaudière de récupération est constituée de 3 parties et chaque partie a 4 économiseurs, 2 évaporateurs et 2 surchauffeurs. Le gaz sort de la chaudière à environ 170 °C. La vapeur d'eau surchauffée produite alimente une turbine multi-étage. Le générateur produit 17 MW d'énergie électrique équivalents à 90 GWh/a, ce qui correspond à 28 % de l'énergie du gaz émis et 16,5 % de la consommation d'énergie électrique du four. Les coûts d'investissement pour l'installation de récupération étaient d'environ 11,7 M € en 1987 (annuité de 20 ans, taux d'intérêt de 11,5 %, coût de l'électricité 0,02 €/kWh)

Coût d'immobilisation du capital	1,81 M €
Opération et maintenance,	0,45 M €
Main d'œuvre (5,5 hommes.an)	0,25 M €
Total	2,51 M €

Applicabilité : La technologie est en général applicable à la fois pour les usines nouvelles et existantes. Puisque cette source d'énergie est présente normalement dans une installation existante, l'une des demandes évidentes envers la récupération de l'énergie est qu'elle soit applicable aux usines existantes.

Documents de référence :

[tm 186, ABB, Récupération de l'énergie dans l'industrie du ferro-silicium 1999]

[tm 187, Elkem, Récupération de l'énergie à partir du gaz chaud dans l'industrie des ferroalliages et du silicium 1999]

[tm 151, Récupération de l'énergie dans l'industrie norvégienne des ferroalliages 1995]

[tm 152, A. Schei, J.K. Tuset, H. Tveit, Alliages à haute teneur en silicium 1998]

[tm 157, 10^{ème} Conférence internationale sur les ferroalliages 1994]

[tm 199, Finkeldei, Rapports de plusieurs visites d'usines en Suède et en Norvège 1998]

EXEMPLE 9.10 RECUPERATION DE L'ENERGIE DES EFFLUENTS GAZEUX DU HAUT FOURNEAU

Description : La production du HC FeMn dans un haut fourneau entraîne la génération d'une quantité importante d'effluents gazeux riches en CO. Ce CO peut être partiellement utilisé comme combustible secondaire pour préchauffer le vent dans les étuves chaudes. Le gaz en excès est brûlé dans une centrale électrique adjacente pour produire de l'électricité.

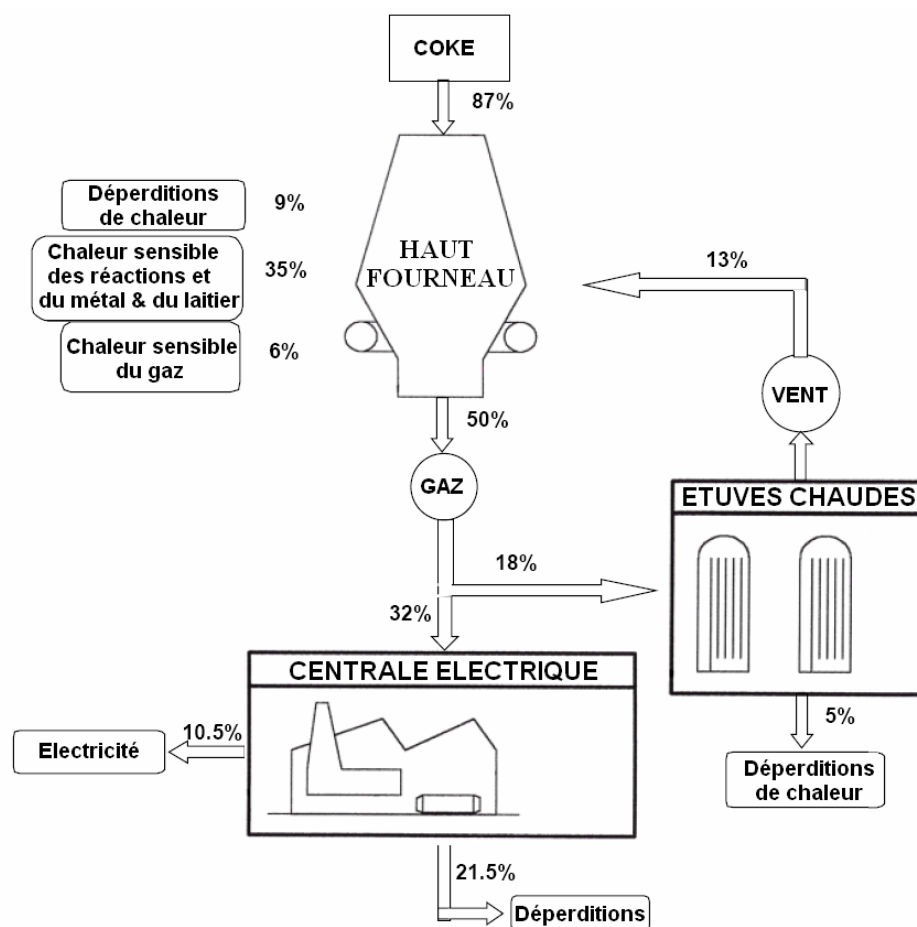


Figure 9.20 : Système de récupération de l'énergie pour un haut fourneau

Principaux bénéfices environnementaux : L'utilisation du CO gazeux réduit les consommations d'énergie globale et de coke du procédé, ce qui minimise par conséquent l'impact du réchauffement climatique par combustion des combustibles fossiles.

Données opérationnelles :

Récupération de l'énergie de l'ensemble de l'usine 52 %
(l'énergie est utilisée dans le procédé de production et récupérée dans les étuves chaudes et pour la production d'électricité)

Énergie récupérée sous forme d'énergie électrique et thermique 23,5 %

Effets croisés : Le traitement des effluents gazeux de haut fourneau est inévitable et induit ainsi une génération d'eaux usées et un résidu solide. Il se pourrait que le préchauffage des combustibles et une augmentation de la température des gaz émis entraînent des émissions plus élevées de NO_x provenant des étuves chaudes. L'utilisation de brûleurs modernes peut réduire les émissions de NO_x .

Aspects économiques : Les coûts d'investissement élevés sont économisés dans une large mesure par les économies d'énergie réalisées en préchauffant le vent et le revenu provenant de la vente d'énergie électrique.

Applicabilité : Applicable aux hauts fourneaux produisant du HC FeMn

Documents de référence :

[tm 195, SFPO 1999]

[tm 199, Finkeldei, Rapports de plusieurs visites d'usines 1998]

[MTD document sur le fer & l'acier]

Pour la production du FeSi et du métal de Si, on a rapporté qu'un four de fusion, qui tourne lentement, peut contribuer à la réduction de la consommation globale d'énergie d'environ 10 % et augmenter le rendement de production du métal.

Les possibilités de récupération de l'énergie ci-dessus sont actuellement mises en œuvre dans divers systèmes de l'industrie des ferroalliages et donnent des résultats satisfaisants depuis de nombreuses années. Cependant, il faut noter qu'un système approprié de récupération de l'énergie implique un investissement élevé. Quand on prend en compte les conditions locales, telles que les prix de l'énergie locale, les périodes de production et l'absence de clients potentiels, les retours sur investissement peuvent dans plusieurs cas n'être pas suffisamment élevés pour justifier de tels investissements d'un point de vue économique.

9.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, pour la production des ferroalliages : les poussières et les fumées, le CO et le CO₂ gazeux, le SO₂, la récupération de l'énergie, les eaux usées, les résidus tels que les poussières sous filtre, la boue et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques

techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations neuves peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux États membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifiques devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

9.4.1 Stockage et manutention des matériaux

Les conclusions tirées sur les meilleures techniques disponibles pour la manutention et le stockage des matériaux sont présentées dans la Section 2.17 de ce document et sont applicables aux matériaux dans ce chapitre.

9.4.2 Sélection du procédé

9.4.2.1 Techniques de prétraitement

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour le prétraitement des matières premières seront partiellement les MTD pour ce secteur. Conformément aux techniques à prendre en compte qui sont présentées pour les techniques de prétraitement, les MTD pour ce secteur sont considérées comme suit :

- Un four à cuve est de préférence utilisé pour le séchage du coke quand l'utilisation de l'énergie récupérée ou des effluents riches en CO provenant du four de fusion comme combustible secondaire est utilisable. Des filtres à manches sont utilisés pour nettoyer les effluents gazeux et le niveau d'émission de poussières associé est de 5 mg/Nm³ ;
- Un four rotatif peut être utilisé pour le séchage ou le dégraissage de la matière première secondaire telle que les tournures ou les déchets de métal. Pour le séchage, des filtres à manches sont utilisés pour nettoyer les effluents gazeux et le niveau d'émission associé pour les poussières est de 5 mg/Nm³ tandis que pour le dégraissage, le résultat optimal de dépollution est atteint en utilisant une post-combustion puis un filtre céramique, ce qui offre la possibilité de recycler l'air chaud dans le sécheur ;
- Pour le dégraissage de la matière première secondaire, une post-combustion peut être utilisée afin de détruire les COV. Un temps de séjour de 2 secondes et une température minimale de 850 °C sont appropriés, cependant des temps de séjour inférieurs (0,5 seconde) peuvent entraîner une destruction complète des COV, mais il faut démontrer ceci au niveau local. Le temps de séjour peut être optimisé afin de minimiser les émissions de COV et la consommation d'énergie et ainsi les émissions de CO₂ et d'autres produits de combustion ;

- Le broyage par voie humide, le filtrage et la granulation conduiront à une surface spécifique de chromite plus élevée et modifieront la vitesse de réduction plus tard dans le procédé de fusion. Un effet supplémentaire est la quantité réduite de poussières générée par procédé de fusion. Grâce à la granulation des fines, les émissions fugitives sont réduites et le matériau fin qui est plus couramment disponible dans le monde peut être utilisé.

9.4.2.2 Frittage

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour le frittage feront partie des MTD pour ce secteur. De plus, la technique à prendre en compte qui est présentée pour le frittage est considérée comme étant une MTD pour le frittage de la chromite. L'utilisation du CO comme combustible secondaire est appropriée mais elle est dépendante du type du four qui est utilisé. Les niveaux d'émission et de consommation associés sont ceux présentés dans l'exemple.

9.4.2.3 Pré-réduction et préchauffage

La technologie utilisée pour la pré-réduction du minerai et des concentrés n'est entièrement mise en œuvre que dans deux usines dans le monde. Ainsi que rapporté, il y a encore quelques problèmes dans la mise en œuvre de cette technologie [tm 141, Finlande, 1999]. La pré-réduction n'est donc pas encore recommandée en tant que MTD générale dans ce secteur. Cependant, pour la future pré-réduction de la chromite et également du minerai de manganèse, elle semble être une technique très prometteuse car elle permet une réduction importante de la consommation d'énergie de l'unité, ce qui implique une réduction de l'énergie électrique nécessaire au procédé de fusion en aval. Ceci peut permettre aussi d'augmenter la productivité du four. Il se pourrait également que le minerai de manganèse pré-réduit joue un rôle important dans les années à venir, en réduisant la consommation élevée de coke en production de HC FeMn dans un haut fourneau.

Le préchauffage des matériaux de charge est approprié autant que possible. La combustion du CO gazeux provenant d'un four de fusion fermé fournit de la chaleur utilisée comme énergie pour le préchauffage, par exemple, de la charge du four dans la production du FeCr. Le préchauffage réduit la consommation d'énergie électrique d'environ 70 à 90 kWh/100 °C d'augmentation de la température de préchauffage du four. La capacité de production d'un four augmente également par préchauffage des matériaux de charge.

9.4.2.4 Procédé de fusion

En fonction des différents ferroalliages produits et de l'impact environnemental des procédés, qui sont influencés par le système de fusion, les fours de fusion présentés dans les deux tableaux suivants sont considérés comme étant les MTD pour ce secteur.

Les fours considérés sont en général tous applicables aux usines nouvelles et existantes. Cependant, il faut tenir compte de la longue durée de vie du four et du coût d'investissement très élevé pour construire un nouveau four ou remplacer un four existant. Les meilleures techniques disponibles pour les fours de fusion ne sont donc fortement applicables qu'aux nouvelles usines et à un changement important ou à un remplacement d'un four. Ceci est spécialement vrai pour le remplacement d'un four ouvert par un four fermé, parce que les parties principales des techniques de dépollution doivent également être modifiées.

Le four ouvert lui-même ne montre pas de consommation électrique ou de coke sensiblement supérieure, mais des quantités considérables d'air ambiant froid sont aspirées dans le four pour brûler le CO qui est présent dans les effluents gazeux. Ceci entraîne par conséquent un débit volumique très important des gaz émis, ce qui ne permet pas la récupération de son contenu énergétique parce que le niveau de température est trop faible et le débit trop important pour construire des échangeurs thermiques techniquement et économiquement efficaces. Le CO généré par le procédé de fusion dans ce cas est transformé en CO₂ et en chaleur sans utiliser son contenu énergétique qui est perdu. Pour

cette raison, le four ouvert n'a pas été considéré comme étant une MTD, mais il peut être toléré si les conditions locales, par exemple les prix locaux de l'énergie, les périodes de production et l'absence de clients possibles, n'ont pas permis la récupération de l'énergie issue d'un four semi-fermé dans des conditions économiques viables.

Pour les fours ouverts existants, une mise à niveau avec une hotte appropriée afin de transformer le four ouvert en un four semi-fermé est appropriée et possible. En appliquant un système de hottes d'extraction de fumée presque fermé, il est possible de limiter l'infiltration d'air, mais en même temps de fournir une quantité d'air suffisante pour brûler le CO généré dans le four. La définition de la température des effluents gazeux, qui est d'environ 300 à 400 °C pour un four ouvert et d'environ 600 à 800 °C pour un four semi-fermé, peut être utilisée pour faire la distinction entre des fours ouverts et semi-fermés. Le débit volumique, qui peut atteindre 100 000 Nm³/t de métal pour un four ouvert et 50 000 Nm³/t de métal pour un four semi-fermé, peut être utilisé comme indicateur. En raison de la température accrue des effluents gazeux dans un four semi-fermé, il faut également prendre en compte l'installation d'un système de récupération d'énergie approprié, parce que l'avantage majeur d'un four semi-fermé est la possibilité de récupérer une partie importante de la chaleur issue du procédé. La récupération de l'énergie peut être effectuée par production de vapeur d'eau dans une chaudière de récupération et par transformation en énergie électrique.

Pour un four semi-fermé ayant une hotte presque fermée, il faut également noter que les exigences en capital d'un système de collecte et de dépollution sont proportionnelles au débit volumique du gaz, de sorte que l'on met l'accent sur la minimisation du volume de gaz. Ceci affectera également l'impact environnemental concernant la quantité totale de poussières émises. En faisant l'hypothèse qu'un filtre à manches de même efficacité est utilisé, le flux massique des poussières émises dans l'atmosphère sera réduit de la même manière que le débit volumique du gaz sera réduit.

Four de fusion	Production de ferroalliage	Applications		Commentaires
		Technique de dépollution	Récupération de l'énergie	
Four à arc électrique semi-fermé	HC FeCr	Filtre à manches	L'énergie thermique peut être récupérée	
	FeSi, métal de Si	Filtre à manches	L'énergie thermique peut être récupérée	
	HC FeMn, SiMn	Filtre à manches	L'énergie thermique peut être récupérée	
	Autres ferroalliages produits par réduction carbothermique Récupération de l'alliage à partir des résidus d'aciérie	Filtre à manches en deux étapes avec injection de charbon actif ou laveur venturi en 3 étapes avec un électrofiltre humide et une élimination du mercure par un filtre de sélénium	L'énergie thermique peut être récupérée L'énergie thermique peut être récupérée	Les autres ferroalliages et ferroalliages spéciaux ne sont normalement produits qu'en petites quantités, l'énergie qui peut être récupérée est donc faible en comparaison avec les ferroalliages courants ; Des fours semi-fermé peuvent également être utilisés pour la production du FeV quand les fines doivent être refondues.
Four à arc électrique fermé	HC FeCr	Laveur humide ou Système de traitement à sec	L'énergie peut être récupérée à partir du CO qui peut être utilisé comme combustible secondaire	Les fours fermé fonctionnent en association avec différentes techniques de pré-traitement et périphériques, telles que des installations de frittage, des fours de préchauffage etc. Ces techniques peuvent toutes avoir une influence positive sur l'impact environnemental, spécialement si les effluents gazeux riches en CO provenant du four de fusion sont utilisés comme combustible.
	HC FeMn, SiMn	Laveur humide or Système de traitement à sec	L'énergie peut être récupérée à partir du CO qui peut être utilisé comme combustible secondaire	
	Autres ferroalliages produits par réduction carbothermique, mais pas de FeSi et de métal de Si	Laveur humide Filtre à manches	L'énergie peut être récupérée à partir du CO qui peut être utilisé comme combustible secondaire	Les ferroalliages spéciaux ne sont normalement produits qu'en petites quantités, l'énergie qui peut être récupérée est donc faible en comparaison avec les ferroalliages courants ; En raison de problèmes opérationnels, le FeSi et le métal de Si ne peuvent pas encore être produits dans un four fermé.

Tableau 9.25 : Fours de fusion considérés comme MTD pour la production de ferroalliages

Four de fusion	Production de ferroalliage	Applications		Commentaires
		Technique de dépollution	Récupération de l'énergie	
Haut fourneau	HC FeMn	Capteur de poussières, électrofiltre et un laveur humide ou Système de traitement à sec	Récupération de l'énergie utilisant les effluents gazeux riches en CO pour le chauffage des étuves chaudes et la production d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> En raison de la consommation élevée de coke, le haut fourneau ne doit être considéré comme une MTD que s'il est associé à une récupération efficace du contenu énergétique des effluents gazeux riches en CO. Cela nécessite une régulation du procédé et un système de dépollution de haute performance. Pour réduire les émissions fugitives, il faut utiliser des systèmes appropriés de hottes d'extraction de fumée au niveau des trous de coulée et des chenaux de coulée. Dans ces conditions, le haut fourneau peut fonctionner avec un faible impact environnemental.
Creuset à garnissage réfractaire enfermé dans une chambre à réaction	Ferroalliages produits par réduction métallothermique	Filtre à manches	La récupération de l'énergie n'est pas mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> La récupération de l'énergie thermique ne sera pas mise en œuvre, parce que la réduction métallothermique se présente comme un procédé en discontinu, qui ne nécessite qu'une courte durée de la réaction ; En raison de la nature biotoxique du fluorure, il faut minimiser autant que possible l'utilisation de spath fluor pour la production du FeMo ou le remplacer ;
Four de grillage à soles multiples	Grillage du minerai de molybdénite	Multi-clones avec électrofiltre sec, laveur humide et une unité de désulfuration	La récupération de l'énergie provenant du four n'est pas mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> Les multi-clones et le électrofiltre sec servent de capteur de poussières et les poussières sont recyclées dans le four ; Pour le dépoussiérage final, un laveur humide est utilisé ; La désulfuration a lieu dans une unité de désulfuration produisant de l'acide sulfurique. L'efficacité de l'installation de désulfuration doit être dans la plage de 98 à 99 % ; Pour les nouvelles usines, il sera possible d'atteindre 99,3 % de conversion sur une base continue avec le procédé de contact à simple absorption.

Tableau 9.26 : Fours de fusion considérés comme MTD pour la production de ferroalliages

9.4.2.5 Régulation du procédé

Les techniques présentées dans les différentes sections du Chapitre 2 décrivant les possibilités de réguler le procédé par des systèmes informatisés feront partie des MTD pour ce secteur. Les plus importantes sont considérées comme étant :

- La régulation du fonctionnement du four pour optimiser les conditions de fonctionnement. Les paramètres clés sont la pression et la température en divers endroits du four et du système de manutention des gaz, la concentration en oxygène et en monoxyde de carbone et la pression du système ;
- La régulation du procédé en utilisant des méthodes pertinentes de sorte qu'il soit possible de maintenir les conditions de fonctionnement au niveau optimal et de déclencher des alarmes pour les conditions qui sont en dehors du domaine de fonctionnement acceptable ;
- Il faut former les opérateurs des usines et leur donner des instructions relatives aux procédures de fonctionnement et aux paramètres de régulations corrects ;
- Utilisation d'une bonne maintenance pour le procédé, les systèmes de dépollution et autres procédés associés. Il faut adopter un système d'inspection.

9.4.2.6 Opérations post-four

Les techniques présentées en tant que techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD sont également les techniques qui sont considérées comme MTD dans ce secteur.

9.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour les techniques de collecte des effluents gazeux ainsi que les techniques de dépollution de l'air feront partie des MTD pour ce secteur. Conformément aux techniques à prendre en compte qui sont présentées pour la collecte et la dépollution des fumées/gaz, les MTD pour ce secteur sont considérées comme suit.

- Un filtre à manches ou des laveurs humides tels que des laveurs en cascade ou venturi sont adéquats pour le dépoussiérage des effluents gazeux du four. Une concentration de matière particulaire résiduelle inférieure à 5 mg/Nm³ pour un filtre à manches et inférieure à 10 mg/Nm³ pour un laveur humide est le niveau associé ;
- Des émissions de poussières bien en dessous des niveaux associés peuvent être atteintes par exemple avec des filtres à membranes si les standards locaux de qualité de l'air ou la présence de composés métalliques nocifs le requièrent ;
- Certains métaux ont des composés toxiques qui peuvent être émis par les procédés et doivent donc être réduits. Pour les composés métalliques tels que le nickel, le vanadium, le chrome, le manganèse etc. en tant que composante des poussières totales, des émissions bien inférieures à celles des émissions de poussières associées de 5 mg/Nm³ pour un filtre à manches et de 10 mg/Nm³ pour un laveur humide sont atteignables. Pour les composés de nickel, des émissions inférieures à 1 mg/Nm³ représentent le niveau associé ;
- Lors de la récupération des ferroalliages à partir des résidus d'aciérie, il faut réduire les poussières et les métaux volatils, notamment le mercure et dans une moindre mesure le cadmium et le plomb. L'utilisation d'un filtre à manches à deux étages avec injection de charbon actif ou de coke de lignite peut remplir cet objectif. En variante, un laveur venturi en 3 étapes combiné à un électrofiltre humide et à un filtre de sélénium peut également être utilisé ;
- Pour les métaux vaporisés toxiques nocifs tels que le mercure, le cadmium et le plomb faisant partie des effluents gazeux, le niveau d'émission associé est inférieur à 0,2 mg/Nm³ ;

- Des systèmes de hottes d'extraction de fumées appropriés connectés à un filtre à manches sont de préférence utilisés pour la collecte et le traitement des fumées émises lors de la vidange et de la coulée. Une conception convenable et une bonne maintenance peuvent assurer une haute efficacité de captage ;
- Il faut enlever le dioxyde de soufre dans les effluents gazeux issus du grillage de la molybdénite et de préférence le convertir en acide sulfurique. L'efficacité de la conversion associée pour une unité de contact à simple absorption est de 98 à 99 %. Pour les nouvelles usines, 99,3 % de conversion sont atteignables.

Le tableau suivant résume les émissions captées associées à l'utilisation des meilleures techniques disponibles et les techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux.

Polluant	Émissions associées à l'utilisation des MTD	Techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	< 5 mg/Nm ³	Filtre à manches	Les filtres à manches sont normalement utilisés pour le dépoussiérage des effluents gazeux des fours ouvert et semi-fermé
	< 10 mg/Nm ³	Laveur humide	Les systèmes de lavage humide sont utilisés pour le dépoussiérage des effluents gazeux des fours fermé et du haut fourneau. Les laveurs venturi utilisés pour nettoyer les effluents gazeux provenant d'un four à HC FeCr fermé atteignent des émissions inférieures à 50 mg/Nm ³ en raison des poussières très fines qui sont produites dans le four, mais qui ne sont pas directement émises dans l'atmosphère. Dans ce cas, les effluents gazeux riches en CO sont utilisés comme combustible secondaire.
Métaux lourds		Filtre à manches	Les filtres à manches de haute performance (par exemple filtres à membrane) peuvent atteindre de faibles niveaux des métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à la concentration de poussières et à la proportion des métaux faisant partie des poussières.
Métal vaporisé (Hg, Cd, et Pb)	< 0,2 mg/Nm ³	Filtre à manches en deux étapes avec injection de charbon actif ou un laveur venturi en 3 étapes, un électrofiltre humide et une élimination du mercure par un filtre de sélénium	En recyclant les ferroalliages à partir des résidus d'aciérie, de l'Hg, du Cd et du Pb peuvent être émis
CO provenant de fours fermés	Pas directement émis dans l'atmosphère	Récupération de l'énergie	Le CO peut être utilisé de diverses manières pour récupérer son contenu énergétique
SO₂ issu du grillage de la molybdénite	Efficacité de conversion de 98 à 99 %	Installation de désulfuration (unité de contact à simple ou double absorption)	La performance de l'installation de traitement des gaz dépend du lot individuel de matière première et du chargement du four et influence donc l'efficacité de la conversion. Avec une unité de contact à double absorption, l'efficacité de la conversion peut être supérieure à 99 % mais en raison de la quantité relativement faible de soufre dans les effluents gazeux du four de grillage, davantage de soufre doit être brûlé afin d'assurer des conditions raisonnables pour l'unité de contact à double absorption.
<p>Note : Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont exprimées comme des moyennes journalières basées sur une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où il n'est pas possible de mettre en œuvre une surveillance continue, la valeur est la valeur moyenne sur la période d'échantillonnage. Pour le système de dépollution utilisé, les caractéristiques du gaz et des poussières seront prises en compte dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte utilisée.</p>			

Tableau 9.27 : Niveaux d'émission dans l'air associés à l'utilisation de MTD

9.4.4 Eaux usées

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour le traitement des effluents et la réutilisation de l'eau feront partie des MTD pour ce secteur. Conformément aux techniques à prendre en compte qui sont présentées pour le traitement de l'eau, les MTD pour ce secteur sont considérées comme suit :

- Les cycles d'eau en circuit fermé sont adéquats pour les laveurs humides, les systèmes de refroidissement et les procédés de granulation ;
- La purge issue des cycles d'eau en circuit fermé doit être traitée pour éliminer la matière particulaire et les composés métalliques de l'eau ;
- Il faut recycler et réutiliser les eaux usées traitées autant que possible ;
- Il faut également traiter et analyser les liquides de lavage avant rejet ;
- Confinement des systèmes de drainage des usines quand cela est possible et traitement des effluents en fonction de leur teneur avec analyse avant rejet ;
- Dans le cas d'une utilisation d'un système d'épuration par voie humide dans le procédé de récupération d'alliage, la purge provenant du laveur peut être traitée par :
 - élimination du cyanure,
 - réduction du Cr_6^+ en Cr_3^+ , précipitation des hydroxydes de métaux à pH élevé conjointement avec une oxydation des cyanures,
 - précipitation du fluorure et élimination des particules de l'eau dans un filtre à sable.

9.4.5 Résidus du procédé

Les techniques et voies de recyclage présentées conjointement avec les niveaux d'émission des résidus dans le Chapitre 2 pour la minimisation des déchets feront partie des MTD pour ce secteur. En général, il faut analyser toutes les étapes du procédé afin de minimiser la génération de résidus du procédé et épuiser toutes les possibilités de recyclage et de réutilisation. Conformément aux procédés qui ont été définis comme étant les techniques appliquées, les manières suivantes de recycler et de réutiliser de laitier et les poussières sous filtre et la boue sont considérées comme les MTD pour ce secteur :

Ferroalliage		Recyclage et réutilisation
FeCr	HC FeCr	<ul style="list-style-type: none">Le laitier concassé en morceaux et le laitier granulé sont utilisés comme matériau de construction de bâtiments et matériau de construction de routes ;Le laitier peut également être utilisé comme grille de décapage au sable, et pour la production de bétons réfractaires.
	MC et LC FeCr	<ul style="list-style-type: none">Il faut réutiliser le laitier autant que possible.
Récupération de l'alliage provenant des résidus d'aciérie		<ul style="list-style-type: none">La faible basicité du laitier permet la formation de silicates stables, qui sont non lixiviables. Le laitier peut être utilisé dans diverses applications relatives à la construction.
FeSi		<ul style="list-style-type: none">La production de métal de silicium et de FeSi est un procédé qui ne génère quasiment pas de laitier (de petites quantités de quartz sont transformées en laitier, < 1 %). Le laitier ne peut pas être recyclé dans le four ;Pendant l'affinage du métal de silicium et du FeSi, de petites quantités de laitier d'affinage sont produites. Le laitier ne peut pas être recyclé dans le four.
Métal de silicium		
Calcium-silicium		<ul style="list-style-type: none">Le laitier peut être recyclé dans le four.
FeMn	HC FeMn	<ul style="list-style-type: none">Le laitier épuisé standard (faible teneur en MnO) d'un haut fourneau peut être utilisé comme matériau de construction ;Le laitier riche d'un haut fourneau (teneur élevée en MnO) peut être vendu sous forme de matière première pour la production de silico-manganèse.
		<ul style="list-style-type: none">Le laitier épuisé standard (faible teneur en MnO) peut être utilisé comme matériau de construction.
	MC FeMn	<ul style="list-style-type: none">Le laitier peut être utilisé comme matière première dans la production de silico-manganèse.
	LC FeMn	<ul style="list-style-type: none">Le laitier peut être utilisé comme matière première dans la production de silico-manganèse.
SiMn		<ul style="list-style-type: none">Le laitier peut être utilisé comme matériau de construction.
FeV		<ul style="list-style-type: none">Le laitier peut être utilisé comme matière première secondaire dans l'industrie manufacturière, par exemple pour la production de matériaux réfractaires.
FeMo		<ul style="list-style-type: none">En fonction de la composition, le laitier peut être partiellement vendu pour un procédé ultérieur.
<p>Notes : Analyse des matériaux résiduels avant leur transfert vers d'autres sites de sorte que les voies de mise en décharge ou de récupération correctes puissent être utilisées.</p> <p>Le laitier sans aucune utilité économique ni technique doit quand même être partiellement mis en décharge. En fonction de la composition du laitier, un traitement spécial du laitier peut être requis avant la mise en décharge.</p>		

Tableau 9.28 : Recyclage et réutilisation du laitier issu de la production de ferroalliages

Ferroalliage		Recyclage et réutilisation
FeCr	HC FeCr	<ul style="list-style-type: none">Les poussières issues du concassage, du transport et de la manutention de la matière première ainsi que les poussières et boue issues des procédés de prétraitement peuvent être recyclées ;Les poussières issues de la manutention des produits de FeCr peuvent être refondues dans le four ou utilisées dans la production d'acier inoxydable.
	MC and LC FeCr	<ul style="list-style-type: none">Les poussières peuvent être recyclées vers le four de fusion.
Récupération de l'alliage provenant des résidus d'aciérie		<ul style="list-style-type: none">Le gâteau de filtration issu du traitement des boues dans le procédé de plasmadust peut être recyclé soit vers l'ISP soit vers le procédé utilisant un four Waelz ;Les poussières du four provenant du four à arc immergé ont une teneur élevée en ZnO (de 20 à 60 %) et en PbO (de 2 à 6 %). Elles sont pelletisées et recyclées par l'industrie du Zn (four de fusion I.F., ou en utilisant le procédé Waelz comme étape de concentration intermédiaire.
FeSi		<ul style="list-style-type: none">La fumée de silice (microsilice) est collectée dans le filtre à manches sous la forme d'un sous-produit. La microsilice est utilisée comme additif dans le ciment, ce qui augmente la résistance du béton et donne une surface très lisse qui protège le béton des infiltrations d'eau.
Métal de silicium Calcium-silicium		
FeMn	HC FeMn	<ul style="list-style-type: none">Les poussières les plus grosses, relativement riches en manganèse, peuvent être agglomérées et recyclées dans le four ou utilisée comme matière première pour la production de silico-manganèse dans un four à arc électrique ;Les poussières fines peuvent parfois être partiellement valorisées dans d'autres industries ou mises en décharge.
	MC FeMn	<ul style="list-style-type: none">Les poussières et les boues peuvent être recyclées, ou valorisées dans d'autres industries.
	LC FeMn	
SiMn		<ul style="list-style-type: none">Les poussières et les boues peuvent être partiellement recyclées ou valorisées dans d'autres industries.
FeNi		<ul style="list-style-type: none">Les poussières peuvent être partiellement recyclées dans le système d'alimentation.
FeV		<ul style="list-style-type: none">Les poussières peuvent être partiellement recyclées dans le procédé de fusion. Les fines de FeV sont refondues.
Grillage de la molybdénite		<ul style="list-style-type: none">Les effluents gazeux émis par le four de grillage contiennent des poussières représentant jusqu'à 15 % du concentré entrant dans le procédé ;La majeure partie des poussières et des boues issues du traitement des effluents gazeux peut être recyclée dans le concentré entrant dans le procédé .
FeMo		<ul style="list-style-type: none">Les poussières peuvent être partiellement recyclées dans le procédé de fusion
Notes : Analyse des matériaux résiduels avant leur transfert vers d'autres sites de sorte que les voies de mise en décharge ou de récupération correctes puissent être utilisées. Les poussières sous filtre et les boues sans aucune utilité économique ni technique doivent quand même être partiellement mises en décharge. Il faut prendre des précautions quand on met en décharge les poussières et les boues, parce qu'en raison de leur nature dangereuse, un traitement spécial peut être requis avant la mise en décharge.		

Tableau 9.29 : Recyclage et réutilisation des poussières sous filtre et des boues collectées à partir de la production de ferroalliages

9.4.6 Récupération de l'énergie

Les techniques et principes généraux de récupération de l'énergie présentés dans le Chapitre 2 feront partie des MTD pour ce secteur. Conformément aux techniques prises en compte et aux voies d'utilisation du CO gazeux ou de récupération de l'énergie thermique issue d'un procédé de fusion, la MTD pour la récupération de l'énergie dans ce secteur est considérée comme suit :

Ferroalliage	Four	Vecteur énergétique	Récupération de l'énergie
FeCr	Fermé	CO gazeux	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Utilisation du CO comme combustible dans les usines voisines,• Combustion directe pour le séchage, le frittage, le préchauffage, le chauffage de la poche etc.,• Utilisation dans une usine de FeCr et d'acier inoxydable intégrée.
	Semi-fermé	Chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Production de vapeur d'eau à haute pression et utilisation dans l'usine en question ou dans des usines voisines,• Production d'eau chaude.
FeSi Métal de Si	Semi-fermé	Chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Production de vapeur d'eau à haute pression et utilisation dans l'usine en question ou dans des usines voisines,• Production d'eau chaude.
FeMn SiMn	Fermé	CO gazeux	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Utilisation du CO comme matière première dans les usines voisines,• Combustion directe pour le séchage, le frittage, le préchauffage, le chauffage de la poche etc.
	Semi-fermé	Chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Production de vapeur d'eau à haute pression et utilisation dans l'usine en question ou dans des usines voisines,• Production d'eau chaude.
FeNi	Semi-fermé	Chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Production d'énergie électrique,• Production de vapeur d'eau à haute pression et utilisation dans l'usine en question ou dans des usines voisines,• Production d'eau chaude.
FeV	Les ferroalliages spéciaux sont normalement produits en petites quantités par rapport aux ferroalliages courants. Le procédé de fusion se présente habituellement comme un procédé en discontinu dans un creuset à garnissage réfractaire. La réaction métallothermique est exothermique et la chaleur produite est utilisée comme source d'énergie pour le procédé, ce qui ne nécessite que quelques minutes dans certains cas		
FeMo			
FeW			
FeTi			
FeB			
FeNb			
La récupération de l'énergie à partir de la chaleur en excès du procédé est difficile et ne justifie pas un investissement élevé pour un système de récupération de l'énergie.			
Notes : La combinaison des différentes techniques de récupération peut augmenter l'efficacité globale d'un système de récupération de l'énergie.			

Tableau 9.30 : MTD pour la récupération de l'énergie dans la production des ferroalliages

Les meilleures techniques disponibles mentionnées ci-dessus pour la récupération de l'énergie sont des techniques qui sont applicables aux nouvelles usines et dans le cas d'un changement important d'une usine existante. Ceci inclut le cas où un four doit être remplacé.

Pour les usines existantes, la mise à niveau d'un four de fusion avec un système de récupération de l'énergie approprié est possible, spécialement quand un four ouvert est transformé en un four semi-fermé. Le contenu énergétique peut alors être récupéré par production de vapeur d'eau dans une chaudière de récupération où la hotte du four peut être avantageusement intégrée dans le système de récupération et utilisée comme surchauffeur. La vapeur d'eau produite peut être utilisée dans le procédé, dans des usines voisines, mais le plus souvent pour la production d'énergie électrique, ce dernier cas sera la meilleure solution sur le plan économique.

Quand on construit un four fermé ou que l'on remplace un four existant par un four fermé, un système de traitement et de récupération pour de CO est inévitable. Le CO, qui sinon doit être brûlé à la torche, peut être utilisé comme combustible secondaire de haute qualité pour une variété d'applications ou

comme matière première ou combustible dans des usines voisines. Le brûlage à la torche du CO n'est acceptable que dans le cas où des clients internes ou externes à l'usine sont temporairement indisponibles. Le CO récupéré peut également être utilisé pour la production d'énergie électrique.

La récupération de l'énergie du procédé réduit la consommation des sources d'énergie naturelles et par conséquent contribue à minimiser les émissions de CO₂ et l'effet du réchauffement climatique si l'impact total du procédé, et l'énergie économisée par ailleurs sont inclus dans le calcul des bilans énergétiques et CO₂ globaux. La récupération de l'énergie est donc une option souhaitable et sera de plus en plus importante dans les années à venir, mais elle n'est appropriée que si les conditions locales (par exemple les prix locaux de l'énergie, la présence de consommateurs d'énergie externes, et les périodes of production) justifient l'investissement. Comme déjà mentionné dans la partie relative aux MTD pour les fours de fusion, la récupération de l'énergie est fortement liée au type de four utilisé (four semi-fermé ou fermé). Il faut donc considérer également la récupération de l'énergie en fonction du contexte et des exigences en termes de modifications de fours existants.

9.5 Technologies émergentes

Les techniques suivantes sont les techniques émergentes, c'est-à-dire que ces techniques ne sont pas entièrement mises en œuvre dans l'industrie des ferroalliages.

- Le four à soles rotatives pour la pré-réduction de la chromite a été étudié ;
- Les procédés utilisant du charbon/oxygène ou une fusion-réduction reposent sur la combustion énergétique du charbon avec de l'oxygène ou de l'air enrichi en oxygène, pour fournir la totalité de la demande énergétique pour la fusion de la chromite en ferro-chrome. Différentes compagnies ont étudié différentes possibilités ;
- Le Mintek Blobulator pour la granulation du ferro-chrome est toujours au stade pilote ;
- Le fonctionnement du four fermé pour la production du ferro-silicium et du métal de silicium n'a pas encore été développé avec succès ;
- Le four de grillage à lit fluidisé pour le grillage de la molybdénite.

Le four de grillage à lit fluidisé n'est pas considéré comme une technologie viable pour le grillage des concentrés de molybdénite. Les usines qui ont utilisé (ou réalisé des travaux préparatoires sur) le grillage des concentrés de molybdénite en utilisant un lit fluidisé ont découvert qu'il ne produit pas un produit ayant une teneur suffisamment faible en soufre pour répondre aux standards commerciaux acceptés. Afin de réduire davantage le niveau de soufre du concentré de molybdénite grillé en-dessous du niveau de 0,10 %, il est nécessaire d'ajouter une autre opération de fusion, telle qu'un four rotatif (avec peut-être une étape de broyage entre les deux) après le lit fluidisé. Ceci conduit à une installation plus complexe sera moins efficace et entraînera des frais d'exploitation supérieurs.

10 PROCÉDES UTILISÉS POUR PRODUIRE LES MÉTAUX ALCALINS ET ALCALINO-TERREUX

Le groupe des métaux alcalins (lithium, sodium, potassium, rubidium, césium et francium) est le premier groupe de métaux (1 A) dans le tableau périodique des éléments. Le groupe des métaux alcalino-terreux (calcium, strontium et magnésium - groupe 2A) a des propriétés similaires et est donc couvert par ce secteur industriel.

Il existe très peu de compagnies au sein de l'Union européenne qui produisent des métaux alcalins et alcalino-terreux ; les procédés utilisés sont donc limités mais sont représentatifs des techniques utilisées sur toute la planète. Il existe deux producteurs de sodium métal et un producteur de lithium dans l'Union européenne. Seule une compagnie produit du calcium et de strontium métal et il existe deux compagnies qui produisent du magnésium métal.

10.1 Procédés et techniques appliqués

10.1.1 Métal de sodium

Le métal de sodium est produit par l'électrolyse du chlorure de sodium fondu (NaCl). Les chlorures de calcium et de baryum (CaCl_2 et BaCl_2) sont ajoutés au NaCl pour former un mélange eutectique, qui fond à 580°C [tm 106, Farrell 1998].

Un diagramme de production du métal de sodium est présenté sur la figure suivante, où la cellule électrolytique est la partie principale du procédé.

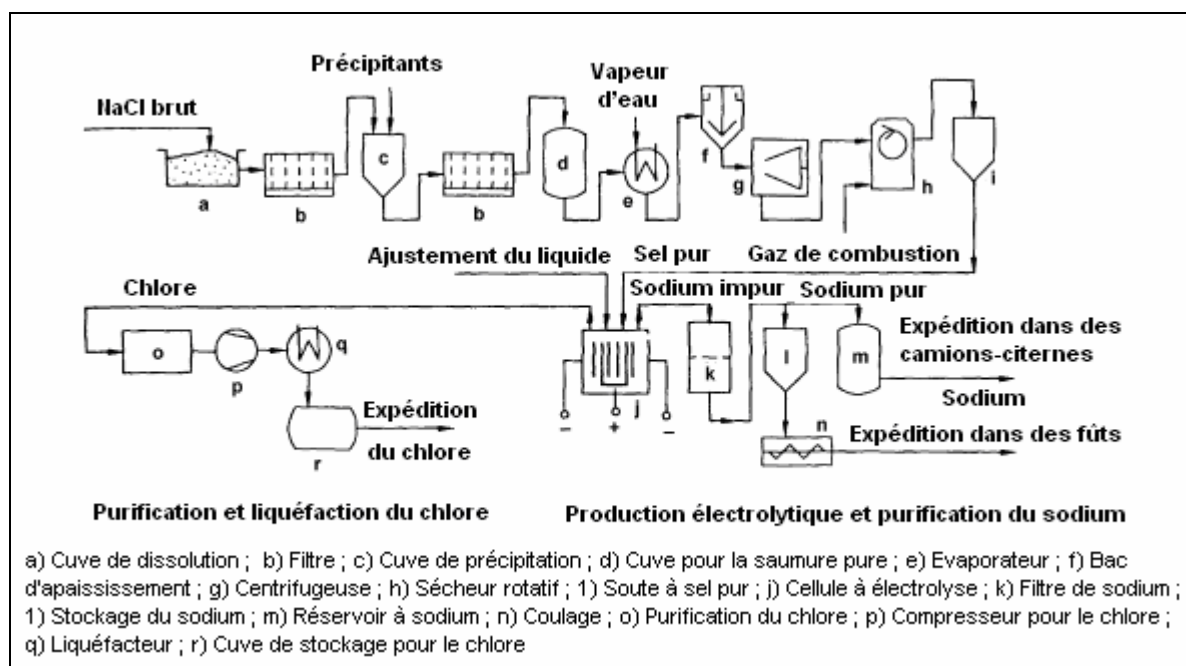


Figure 10.1: Schéma de succession des opérations de la production du sodium [FIGURE : liquide → bain, coulée → coulage]

[tm 107, Ullmanns 1996]

Des cellules Downs sont utilisées et ont une anode cylindrique spéciale et une cathode concentrique circulaire séparée de l'anode par un diaphragme à maille d'acier. Chaque cellule a normalement 4 paires d'électrodes. L'énergie issue de l'électrolyse est suffisante pour garder l'électrolyte fondu et aucun chauffage supplémentaire n'est nécessaire. La tension de la cellule est de 6,2 à 7 V et celle-ci est utilisée pour surveiller et réguler le procédé. Les matières premières sont reçues sous forme de

cristaux et elles sont séchées dans un sécheur rotatif avant utilisation ; les poussières sont extraites et épurées. La concentration du chlorure de sodium dans le bain électrolytique est maintenue dans la plage souhaitée en alimentant continûment du sel dans les cellules à la même vitesse qu'il est électrolysé pour former du sodium et du chlore, maintenant ainsi un niveau constant du bain électrolytique. Le sodium et le chlore sont collectés, sous la surface du bain électrolytique, dans des compartiments distincts d'un dispositif de collecte. Le chlore est amené continûment sous une légère dépression, vers une installation de production du chlore, où il est normalement liquéfié et transféré dans les réservoirs de stockage de chlore liquide. Le sodium remonte, poussé par le poids du bain au-dessus du dispositif de collecte, le long d'un tube de dégagement à ailettes d'où il déborde continûment via un déversoir dans des réservoirs. Ceux-ci sont soutirés toutes les deux heures et versés dans des réservoirs portatifs plus grands, d'une capacité correspondant à 24 heures.

Une petite quantité de chlorure de calcium dans les cellules est également électrolysée, conjointement avec le chlorure de sodium, formant ainsi du calcium et du chlore. Une partie de ce calcium métallique est évacuée des cellules sous forme d'impureté dans le sodium et est séparée au fur et à mesure que le métal refroidit. Ce chlorure de calcium dans le bain électrolytique est remplacé en ajoutant du chlorure de calcium granulaire sec aux cellules quotidiennement. Le chlorure de baryum n'est pas électrolysé. Des filtres enlèvent du sodium le sous-produits de calcium et le sodium purifié provenant des filtres est transféré sous vide aux réservoirs de stockage intermédiaires, et de là par gravité aux réservoirs de stockage finaux.

Le gâteau de filtration issu de l'étape de nettoyage du sodium est pressé pour enlever le sodium puis il est lavé, en le dissolvant sous forme d'effluent alcalin. Celui-ci est utilisé comme réactif pour traiter les autres effluents du site. Les autres déchets solides proviennent du sédiment dans les réservoirs de stockage, ceux-ci sont brûlés sur une sole ouverte et les fumées sont collectées et épurées dans un laveur humide à deux étages, ce laveur déverse les effluents dans un troisième étage en utilisant de l'HCl qui traite également les fumées issues du lavage du gâteau de filtration. Une « cellule Downs » typique pour la production électrolytique du métal de sodium est montrée sur la figure ci-après.

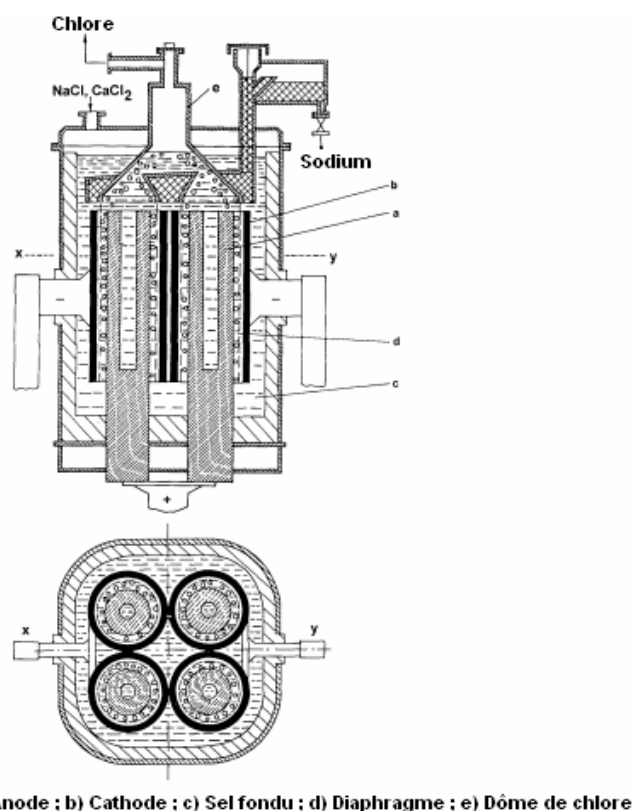


Figure 10.2: La cellule Downs

[tm 107, Ullmanns 1996]

10.1.2 Métal de lithium

Celui-ci est produit par l'électrolyse d'un mélange eutectique fondu de chlorure de lithium (LiCl) et de chlorure de potassium (KCl) à 450 °C [tm 106, Farrell 1998]. Le carbonate de lithium est reçu dans les IBC et est converti en LiCl ; la solution est concentrée et cristallisée. L'hydroxyde de lithium résiduel peut également être converti. Les cristaux de LiCl sont séchés avant d'être mis en fûts pour l'alimentation manuelle dans les cellules. Il y a une certaine extraction de poussières ponctuelle aux points de manutention. Le KCl n'est pas électrolysé à la tension utilisée (de 4 à 5 V) et seul du LiCl est ajouté aux cellules pendant l'opération.

Les cellules sont des baignoires rectangulaires contenant chacune 5 paires d'électrodes (une anode de carbone cylindrique et une cathode d'acier circulaire concentrique). Il n'y a aucune membrane dans ce procédé et ceci est susceptible de réduire l'efficacité de l'électrolyse, puisqu'une partie du lithium libéré (provenant de la surface interne de la cathode) réagira avec le chlore pour reformer du LiCl. Les cellules peuvent être chauffées par des brûleurs à gaz pour le démarrage et en fonctionnement hivernal mais normalement, une quantité suffisante de chaleur est générée par électrolyse pour garder le bain liquide. La durée de vie des cellules est de ~7 ans et elle est déterminée par l'usure de la plaque du déversoir.

Le lithium liquide est produit et s'accumule à l'avant de la cellule et est écrémé manuellement en utilisant un écrémateur à maille fine dans une poche manuelle. Le métal est alors immédiatement coulé dans des petits moules (~350 mm x 50 mm x 50 mm), aucune fumée de métal ne sont produites mais les moules remplis sont immédiatement recouverts d'une huile minérale pour empêcher l'oxydation. Ceci provoque des vapeurs d'huile, qui sont extraites dans un capteur à bec vertical et émises sans avoir été traitées par une cheminée conjointement avec les autres fumées extraites de la chambre de la cellule qui contiennent les alcalins, les poussières et le chlore. Une barre de lithium peut également être produite en petites quantités en utilisant une presse hydraulique à commande manuelle.

Le chlore produit par la cellule est collecté sous vide partiel et est absorbé dans de la soude caustique pour produire de l'hypochlorite de sodium, qui est vendu. Deux colonnes d'absorption sont utilisées, dont l'une en attente pour utilisation en cas d'urgence.

Le courant et la tension appliqués régulent le procédé. Les déclencheurs de redresseurs de courant sont facilement manipulés et ne posent de problèmes que pendant l'écumage quand l'agitation induite par le courant de l'électrolyte s'arrête. D'autres problèmes proviennent de la présence de sodium sous forme d'impureté dans l'électrolyte quand il est électrolysé et est séparé du Li quand il refroidit. Le Na forme des petits « champignons » sur la surface du métal et ceux-ci s'enflamment et peuvent entraîner la combustion du lingot, la teneur en sodium de la matière première est régulée pour prévenir ceci.

Il n'y a aucun rejet dans l'eau ; la solution mère provenant de la cristallisation est remise en circulation.

10.1.3 Métal de potassium

Au moment de la rédaction, le métal de potassium n'est produit à une échelle industrielle que par la réduction du chlorure de potassium avec du sodium métal. En production continue, une distillation fractionnée est incorporée dans une colonne de réaction remplie de chlorure de potassium liquide. En chargeant du sodium dans la colonne, un mélange de vapeurs de sodium et de potassium est fractionné. Du métal de potassium est alors obtenu par distillation du mélange de vapeurs en utilisant de l'air comme fluide de refroidissement [tm 107, Ullmanns 1996].

10.1.4 Métal de calcium et de strontium

Des métaux de calcium et de strontium sont utilisés pour une variété d'applications. Le calcium en tant qu'élément d'alliage améliore la qualité des aciers, spécialement les propriétés mécaniques telles que l'aptitude au formage, l'étirage et l'usinabilité. En raison de sa forte aptitude à former des oxydes et des sulfures, le calcium est important dans la production de l'acier ultrapur. Le métal de calcium

peut également être utilisé pour effectuer la dé-bismuthation du plomb. Le métal de strontium est nécessaire dans l'affinage de l'aluminium ainsi que pour le raffinage du laitier d'acier.

10.1.4.1 Métal de calcium

Le métal de calcium peut être produit par électrolyse ou réduction métallothermique, mais actuellement le seul procédé utilisé dans l'Union européenne est la réduction sous vide à haute température de l'oxyde de calcium avec de l'aluminium en utilisant le procédé métallothermique. Cependant une brève description du procédé d'électrolyse va être donnée.

10.1.4.1.1 Le procédé électrolytique

La cellule électrolytique de base est une cuve garnie de graphite remplie de chlorure de calcium partiellement fondu maintenue à une température supérieure au point de fusion du CaCl_2 , mais inférieure au point de fusion du métal de calcium. Le métal de calcium apparaît sous la forme d'un dépôt solide dans une anode refroidie à l'eau. Ce calcium contient de 15 à 25 % de sels piégés et doit être refondu pour réduire les niveaux d'impuretés.

10.1.4.1.2 Le procédé métallothermique

La production du calcium métal dépend d'un équilibre sur un domaine étroit avec du calcium vapeur dans la plage de 1 000 à 1 200 °C. La vapeur de calcium est alors transférée à l'aide d'une pompe à vide dans une zone refroidie du réacteur où la condensation a lieu. Ceci déplace l'équilibre du côté de la réaction et permet de former davantage de vapeur de calcium.

De la chaux est broyée afin d'obtenir un matériau ayant une petite taille des particules qui est alors mélangé à sec avec la quantité souhaitée d'aluminium. Le mélange des deux est alors compacté sous forme de briquettes pour assurer un bon contact des réactifs. Les briquettes sont alors chauffées dans le four, qui est chauffé électriquement par une résistance, jusqu'à environ 1 300 °C. En raison du vide dans le four, un bloc condensé contenant plus de 95 % de métal de calcium se forme dans la partie refroidie du four. Ces blocs de métal de calcium et de résidu d'aluminate de calcium sont alors retirés du four. Pour certaines applications, la taille du métal de calcium doit être réduite, ce qui peut être fait en utilisant des broyeurs spéciaux adaptés aux caractéristiques du calcium. Un diagramme caractéristique de la production du métal de calcium est montré ci-dessous.

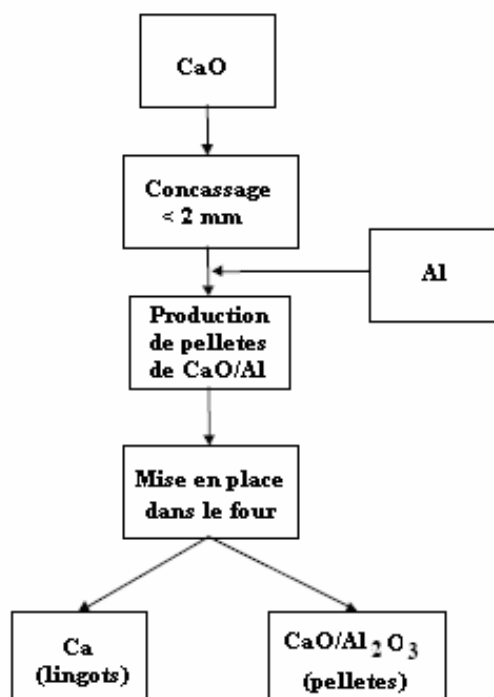


Figure 10.3: Diagramme de production de métal de calcium

10.1.4.2 Métal de strontium

Le métal de strontium n'est produit dans l'Union européenne que par réduction thermique de l'oxyde de strontium avec de l'aluminium comme agent réducteur. La réaction est réalisée d'une manière similaire à la production de métal de calcium dans un four sous vide. Le métal vaporisé est condensé dans une partie refroidie du four. Les blocs de métal de strontium et le résidu d'aluminate de strontium sont retirés du four. Le métal de strontium est alors vendu tel quel sans aucun broyage supplémentaire. Un diagramme caractéristique de la production du métal de strontium est montré ci-dessous.

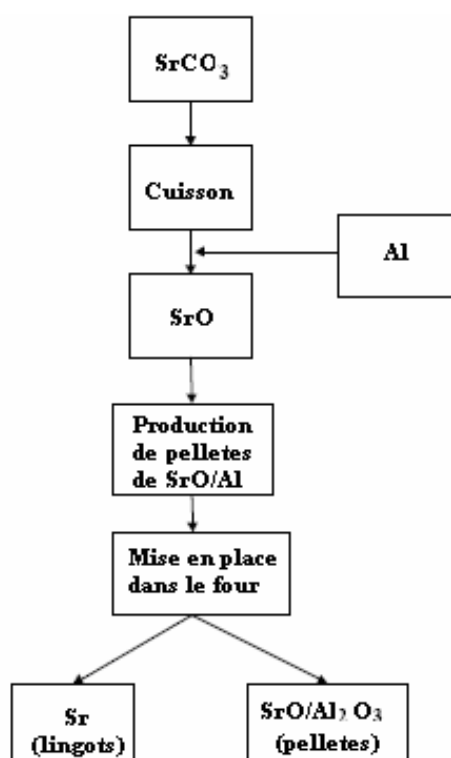


Figure 10.4: Diagramme de production de métal de strontium

10.1.5 Métal de magnésium

Le métal de magnésium et les alliages contenant du magnésium ont une large utilisation dans différents secteurs industriels, par exemple comme élément d'alliage dans l'aluminium ainsi que dans les applications dans l'automobile, les télécommunications ou l'électricité. Le magnésium peut également être utilisé pour la protection cathodique des conduites, des réservoirs et des ponts.

Le magnésium peut être produit soit par électrolyse soit par un procédé de réduction thermique. Les matières premières utilisées sont la dolomite, la magnésite, la carnalite, les saumures ou l'eau de mer, en fonction du procédé. Le magnésium peut aussi bien être récupéré et produit à partir d'une variété de matières premières secondaires contenant du magnésium.

10.1.5.1 Production de magnésium primaire par réduction thermique

Dans le procédé de réduction thermique, de la dolomie calcinée réagit avec du ferro-silicium, parfois conjointement avec de l'aluminium dans un four ou une cuve à cornue. Le procédé de calcination a lieu par décarbonatation et déshydratation de roche dolomitique. Pour le procédé de calcination pour la dolomie calcinée, un four rotatif ou vertical peut être utilisé. Un schéma d'ensemble du procédé de réduction thermique donne la figure suivante.

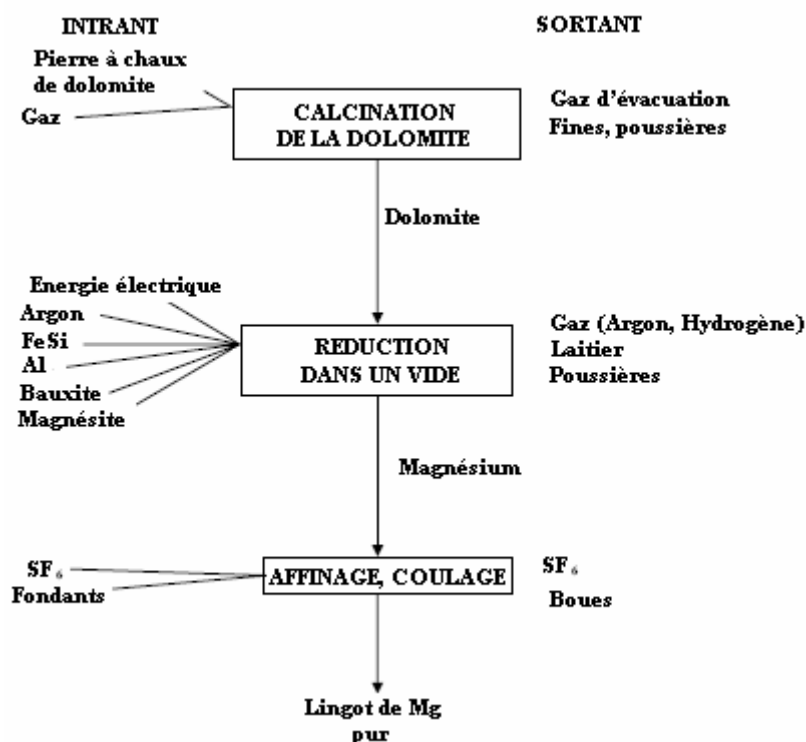


Figure 10.5 : Schéma de succession des opérations du procédé de réduction thermique pour produire du métal de magnésium [FIGURE : pierre à chaux de dolomite → roche dolomitique, dolomite → dolomie, coulage → coulée, réduction dans un vide → réduction sous vide]

Le procédé métallothermique a lieu sous vide et produit de la vapeur de magnésium, qui est ensuite condensée sous forme liquide ou solide. Cette opération est réalisée dans un four électrique alimenté par effet Joule où le laitier liquide se comporte comme une résistance entre l'électrode et la sole à garnissage carboné. La réduction est réalisée à 1 700 °C et à une pression de 6 kPa. Des réducteurs et des oxydes sont introduits continûment sur le laitier. De l'argon est également introduit pour former une atmosphère inerte. Le magnésium est condensé dans un condenseur refroidi à l'eau (creuset). Ce

creuset est démonté quand il est plein, puis acheminé dans la fonderie pour produire des lingots de magnésium.

10.1.5.2 Production électrolytique de magnésium primaire

Le procédé électrolytique produit du magnésium via l'électrolyse du chlorure de magnésium, qui peut être produit à partir de diverses matières premières. Dans ce qui suit, la production à partir de dolomite et d'eau de mer est décrite, ainsi que mise en pratique par un producteur européen. La dolomite, qui est amenée à l'usine, est alors calcinée dans un four de calcination par suspension de gaz. La charge est introduite via des cyclones à contre-courant dans les effluents gazeux chauds, puis calcinée en dolomie calcinée (« dolime ») dans un réacteur alimenté au gaz.

La dolomie calcinée est éteinte avec de l'eau de mer pour produire un hydroxyde de magnésium précipité. Avant l'extinction, l'eau de mer est décarbonatée par lavage avec de l'air après acidification avec de l'acide chlorhydrique. L'hydroxyde de magnésium est concentré en réduisant l'eau dans un bac d'épaississement. La pulpe d'hydroxyde de magnésium résultante est chargée dans un four rotatif et calcinée pour former un oxyde de magnésium modérément calciné. L'oxyde de magnésium est alors mélangé avec le carbone et pelletisé.

Les granulés sont chargés dans les chlorateurs, qui sont des fours à cuve à garnissage de brique. Les chlorateurs sont alimentés par le haut, et le chlore gazeux qui est recyclé à partir de l'étape d'électrolyse est introduit par le bas. La réaction dans le four convertit l'oxyde de magnésium en chlorure de magnésium, qui sous la forme liquide est purifié en passant sur les résistances carbonées à contre-courant par rapport au chlore gazeux entrant. Le chlorure de magnésium liquide est retiré du four et transféré via des cuves fermées vers l'étape d'électrolyse.

Le chlorure de magnésium est électrolysé dans les cellules électrolytiques à 300 - 400 kA pour former du métal de magnésium liquide. Le métal de magnésium est retiré des cellules et transporté dans des cuves fermées dans la halle de coulée où le métal est coulé sous forme de magnésium pur ou d'alliages de magnésium en lingots. Pour protéger le métal de l'oxydation par l'air environnant, l'utilisation d'hexafluorure de soufre (SF_6) dans le procédé de coulée peut protéger la surface du métal.

Les effluents gazeux provenant des fours de chloration sont traités dans une série de laveurs humides et d'électrofiltres humides avant d'être finalement soumis à une incinération. Du SO_2 gazeux est ajouté aux effluents gazeux entre les étapes de lavage pour convertir le Cl_2 en HCl et ainsi augmenter l'efficacité du laveur.

Les écoulements d'eau contaminée provenant principalement du traitement des effluents gazeux issus de la chloration sont traités dans une installation de traitement de l'eau en deux étapes. La première étape est constituée par une floculation et une séparation des solides, la seconde étape est constituée par une épuration à l'aide de charbon actif.

Le procédé de production de magnésium par électrolyse est montré sur la figure suivante.

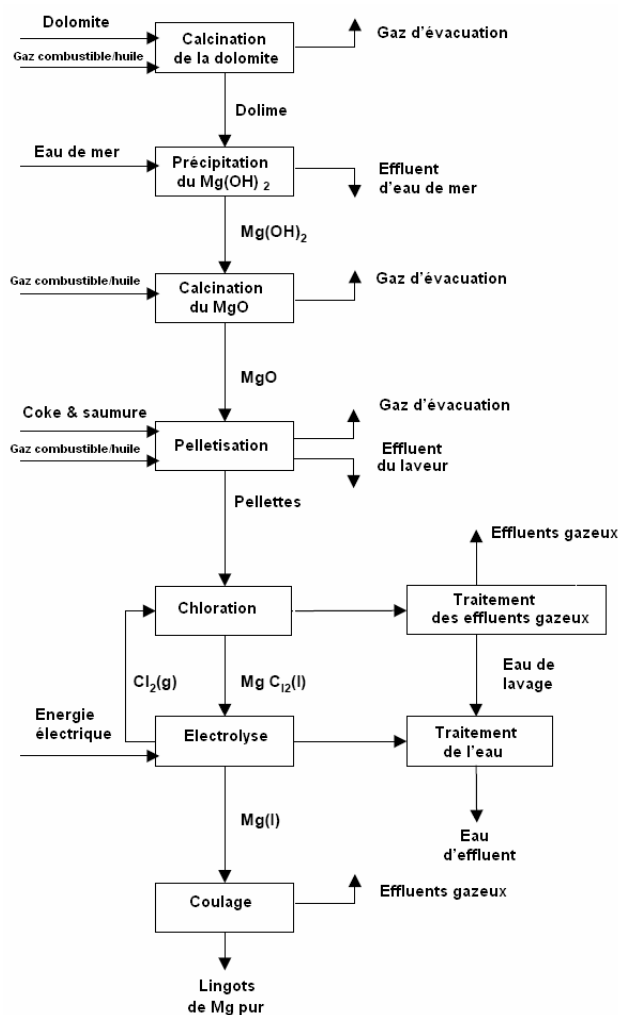


Figure 10.6 : Diagramme du procédé de production de magnésium par électrolyse [FIGURE : gaz combustible/huile → combustible gazeux/liquide, gaz d'évacuation → effluent gazeux, dolime → dolomie, coulage → coulée]

10.1.5.3 Production de magnésium à partir de matière première secondaire

En raison de la disponibilité croissante des déchets de magnésium et autres matières premières secondaires contenant du magnésium, la production de magnésium secondaire est de plus en plus importante. Les déchets d'alliages de magnésium peuvent être directement recyclés sur site ou envoyés vers une installation de recyclage externe. Selon leur qualité, les matériaux de magnésium recyclables peuvent être classés comme suit.

Type de matière première secondaire	Classification	Description
Déchets de magnésium	Type 1 A	Déchets propres de haute qualité, par exemple déchets de coulée, galettes etc.
	Type 1 B	Déchets propres ayant une surface élevée, par exemple coulées fines, ébarbages etc.
	Type 2	Déchets propres avec insertions d'acier/aluminium. Aucune contamination par du cuivre ou du laiton. S'ils sont contaminés par du cuivre ou du laiton, les déchets reçoivent un traitement spécial

	Type 3	Déchets de coulée, peintes avec/sans insertions d'acier/aluminium. Aucune contamination par du cuivre ou du laiton. S'ils sont contaminés par du cuivre ou du laiton, les déchets reçoivent un traitement spécial
Autre matériau contenant du magnésium	Type 4	Déchets de métal souillés, par exemple huileux, humides, contaminés. Le matériau peut contenir : Contamination par du silicium par exemple tonnelage, moulures, sable, etc ; Alliages d'aluminium ; Alliages contaminés par du cuivre ; Balayures non constituées par du magnésium.
	Type 5 A	Copeaux qui sont propres, secs et non contaminés
	Type 5 B	Copeaux qui sont huileux et/ou humides
	Type 6 A	Résidus exempts de fondant, par exemple boue de creuset, crasse etc., qui doivent être secs et exempts de silice (exempts de sable)
	Type 6 B	Résidus contenant des fondants par exemple boue de creuset, crasse etc., qui doivent être secs et exempts de silice (exempts de sable)

Tableau 10.1 : Définition des déchets et des matériaux contenant du magnésium pour le recyclage

Une production de magnésium secondaire typique est montrée sur la figure suivante.

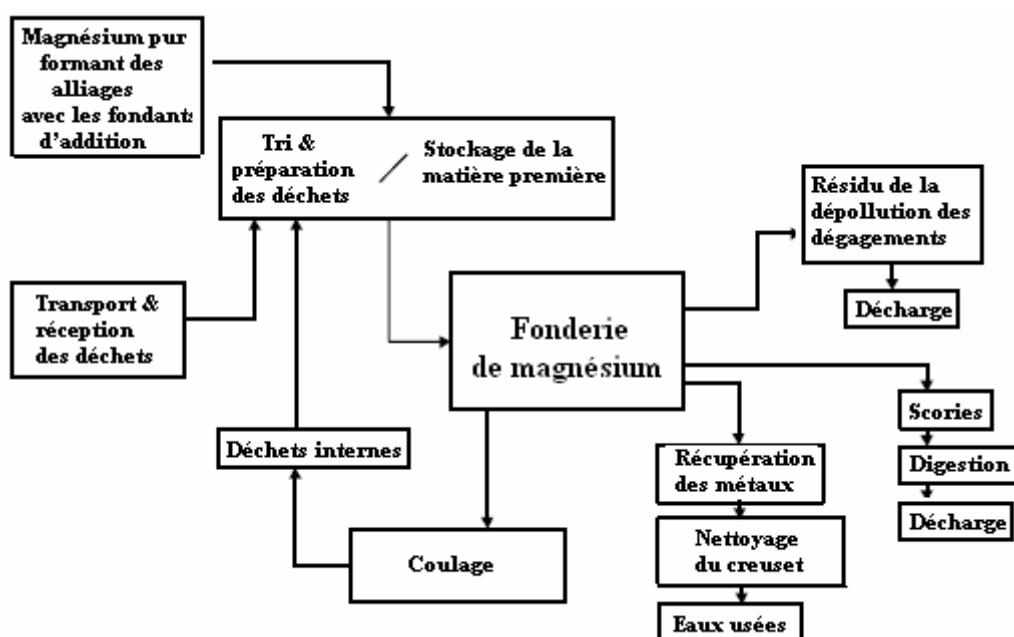


Figure 10.7 : Schéma de succession des opérations d'un procédé de production pour le magnésium secondaire [FIGURE : 1^{er} case → magnésium pur, ajout d'alliages, fondants ; dégagements → émissions atmosphériques]

Le procédé commence avec la réception des différentes matières premières secondaires. Après un contrôle de la qualité pour définir le type des déchets, ils sont stockés séparément afin de définir la manière la plus appropriée d'effectuer le recyclage. La matière première triée est alors envoyée dans l'atelier de fusion. La fusion et l'alliage du magnésium sont réalisés dans des fours à chauffage indirect (gaz ou électrique). On peut utiliser des fondants ou un gaz tampon inerte, de l'hexafluorure de soufre (SF_6). Le métal fondu est alors coulé sous forme de lingots de magnésium secondaires de produits semi-finis.

10.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

La production des métaux alcalins ainsi que du métal de calcium, de strontium et de magnésium a un impact environnemental sur l'air, l'eau et les sols, où les émissions les plus importantes peuvent se classer en principe comme suit.

- **Consommation de matière première et d'énergie**
 - Consommation de matière première et d'énergie
- **Émissions dans l'air**
 - Les poussières provenant de la calcination de la dolomie et de l'oxyde de magnésium
 - Le chlore et le HCl faisant partie des gaz venant des cellules et de la ventilation de la halle d'électrolyse
Les hydrocarbures chlorés issus de l'utilisation des techniques de réfrigération et de compression pour liquéfier le chlore
 - Le SF₆ qui est utilisé dans l'opération de coulée pour protéger le magnésium liquide de la ré-oxydation
 - Les dioxines générées par l'étape de chloration dans la production électrolytique du magnésium primaire
- **Résidus solides, déchets et sous-produits**
 - Les poussières, les fumées et la boue
 - L'aluminate de calcium et de strontium
- **Émissions d'eaux usées**
 - L'eau de trop-plein provenant des systèmes de lavage d'épuration des gaz par voie humide
 - Les dioxines, parce que la production de magnésium dans un procédé électrolytique génère des dioxines issues de l'étape de chloration, qui doivent être retirées de l'eau de lavage
 - Les purges des cycles de l'eau de refroidissement

10.2.1 Consommation de matière première et d'énergie

La quantité d'énergie requise pour la production du métal de calcium en utilisant le procédé métallothermique est d'environ 20 à 25 kWh/kg de métal produit. A cette énergie directe on doit ajouter l'énergie employée pour produire le CaO calciné et l'aluminium produit électrolytiquement. La production de métal de calcium par électrolyse, qui n'est pas utilisée en Europe, requiert environ de 33 à 55 kWh/kg de métal de calcium pour une efficacité actuelle d'environ 60 %.

La consommation d'énergie électrique dans l'électrolyse du magnésium est dans la plage de 13 à 14 kWh/kg de Mg. A ceci on doit ajouter l'énergie requise pour la production du chlorure de magnésium à partir des diverses matières premières.

10.2.2 Émissions dans l'air

Les données disponibles des émissions dans l'air pour la production des métaux alcalins et alcalino-terreux sont présentées en termes de facteurs d'émission spécifiques, à savoir en se basant sur une unité de masse de produit dans les sections suivantes.

Polluant	Métal de sodium		Métal de lithium	
	mg/Nm ³	g/t	mg/Nm ³	g/t
Chlore	0,1 - 1	0,05	1 - 16	18,2
HCl	n.d.	n.d.	1 - 2	103
Réfrigérant R 22 (N 1)		200	n.d.	n.d.
Poussières	4 - 6	120	n.d.	n.d.
Notes : (N 1) R 22 est une ODS (ozone depleting substance – SDO : substance destructrice de l’ozone) et son élimination progressive est ciblée. n.d. = données non disponibles				

Tableau 10.2 : Émissions dans l’air lors de la production de métal de sodium et de lithium

L’impact environnemental principal vers l’atmosphère par production de métal de calcium et de strontium est représenté par les émissions de poussières. Les poussières peuvent être générées par déchargement et concassage de la chaux calcinée, par mélange et compactage de la chaux et de l’aluminium et par broyage et tamisage du métal produit. En raison de l’opération de cuisson qui est nécessaire pour produire l’oxyde de strontium pour la production du métal de strontium, environ 420 kg de CO₂ sont générés vers l’atmosphère pour chaque tonne d’oxyde de strontium produite.

La production du métal de magnésium est liée à l’émission de poussières, de SO₂, de NO_x, de Cl₂, de HCl, de dioxine et dans plusieurs cas à l’émission d’hexafluorure de soufre (SF₆). Les poussières sont principalement émises par la calcination de la dolomie. La dioxine est générée à partir du four de chloration où l’oxyde de magnésium est converti en chlorure de magnésium. L’émission d’hexafluorure de soufre (SF₆) est due au besoin de protéger le métal de magnésium d’une ré-oxydation. Il faut noter que le SF₆ a un potentiel de réchauffement global très élevé (23 900 fois l’effet du CO₂) et que c’est donc une substance régulée par le protocole de Kyoto. Cette substance doit donc être remplacée dès que possible.

Polluant	Source et concentration mg/Nm ³	Unité de masse/t de métal de magnésium
Poussières	Issues de la calcination de la dolomie 100 (N 1) Issues de la calcination du MgO 16 Issues du séchage des granulés 40 Issues du traitement des effluents gazeux issus de la chloration 3 Issues de la chloration (gaz d'évent) 16	4 kg/t (représentant l'intégralité du procédé)
SO₂	Issu de la calcination de la dolomie 30 Issu de la calcination du MgO 80 Issu du séchage des granulés 30 Issu du traitement des effluents gazeux issus de la chloration traitement 200 Issu de la chloration (gaz d'évent) 50	7 kg/t (représentant l'intégralité du procédé)
NO_x	Issu de la calcination de la dolomie 80 Issu de la calcination du MgO 110 Issu du séchage des granulés 50	3 kg/t (représentant l'intégralité du procédé)
Cl₂ et HCl	Issus du traitement des effluents gazeux issus de la chloration 70 Issus de la chloration (gaz d'évent) 50 Issus de l'électrolyse 3	4 kg/t (représentant l'intégralité du procédé)
Dioxine	Issue du traitement des effluents gazeux issus de la chloration 0,8 ng/Nm ³ Issues de la chloration (gaz d'évent) 0,8 ng/Nm ³ Issue de l'électrolyse/chloration (halle/gaz)	12 µg TEQ /t 28 µg TEQ /t 13 µg TEQ /t
CO₂	Emissions provenant de l'intégralité du procédé	6,3 t/t
SF₆	Provenant de la halle de coulée (N 2)	0,45 kg/t de magnésium coulé
Notes : (N 1) Les effluents gazeux provenant du four de calcination par suspension de gaz qui est utilisé pour la calcination de la dolomie sont épurés en utilisant un filtre électrostatique (N 2) Du SF ₆ est utilisé dans le procédé de coulée pour protéger le magnésium d'une ré-oxydation. Le SF ₆ a un pouvoir de réchauffement global très élevé (23 900 fois l'effet du CO ₂) et est donc une substance régulée par le protocole de Kyoto. Cette substance doit donc être remplacée dès que possible. n.d. = données non disponibles		

Tableau 10.3 : Émissions dans l'air lors de la production de métal de magnésium en utilisant le procédé électrolytique de chloration

Polluant	Source	mg/Nm ³	Unité de masse/t de métal de magnésium
Poussières	Calcination de la dolomie	< 100	3,5 kg/t.
CO ₂		130 - 180 g/Nm ³	4,5 - 6 t/t
SO ₂		0,5	0,016 kg/t
NO _x		90	3,1 kg/t
N ₂ O		4	0,13 kg/t
Poussières	Réduction sous vide	n.m.	0,5 kg/t (N 3)
Argon		n.m.	4,3 Nm ³ /t
Hydrogène		n.m.	0,7 Nm ³ /t
Dioxine	Réduction, affinage et fusion	0,08 ng/Nm ³	3 µg/t de TEQ
SF ₆	Affinage et coulée	n.m.	0,5 - 1 kg/t
Notes : (N 1) Le SF ₆ est utilisé dans le procédé d'affinage et de coulée pour protéger le magnésium d'une ré-oxydation. Le SF ₆ a un pouvoir de réchauffement global très élevé (23 900 fois l'effet du CO ₂) et est donc une substance régulée par le protocole de Kyoto. Cette substance doit donc être remplacée dès que possible. (N 2) Les données présentées ne sont basées que sur une seule mesure (N 3) En utilisant un laveur humide n.d. = données non disponibles n.m. = non mesuré			

Tableau 10.4 : Émissions dans l'air lors de la production de magnésium métal en utilisant le procédé de réduction thermique

10.2.3 Émissions typiques dans l'eau

Pour la production des alcalins et des métaux alcalins, les émissions dans l'eau sont très dépendantes du procédé utilisé, par exemple du système de dépollution utilisé et du type de traitement des eaux usées. Il existe une variété de différents systèmes de collecte de l'eau et de traitements des eaux usées. Les polluants principaux de l'eau sont les solides en suspension, les composés métalliques et dans le cas de l'électrolyse du magnésium, également les hydrocarbures chlorés et les dioxines. La production de métal de calcium et de strontium n'est pas liée à la génération d'eaux spécifiques au procédé. Les informations disponibles sur les émissions dans l'eau sont présentées dans les tableaux suivants.

Composé	Métal de sodium	Métal de lithium mg/l
Chlore total	Effluent réutilisé	n.d.
Solides en suspension	Effluent réutilisé	20 - 40

Tableau 10.5 : Émissions dans l'eau lors de la production de sodium métal et de lithium métal
[tm 106, Farrell, 1998]

Polluant	Source	Émissions mg/Nm ³ d'eau	Unité de masse/t
Hydroxyde de magnésium	extinction de la dolomie		21 kg/t de MgO
Hydroxyde de calcium	extinction de la dolomie		100 kg/t de MgO
coke	granulation		1,6 kg/t de métal de Mg
Hydrocarbures chlorés (N 1)	traitement de l'eau	0,15	0,017 g/t de métal de Mg (Total 0,053)
Dioxine	traitement de l'eau	100 ng/Nm ³	13 µg/t de métal de Mg Total 33 µg/t de métal de Mg (équivalents TCDD)
Notes : (N 1) Somme de l'hexachlorobenzène, du pentachlorobenzène et de l'octachlorostyrène n.d. = données non disponibles			

Tableau 10.6 : Émissions dans l'eau lors de la production de métal de magnésium en utilisant le procédé électrolytique

La production de magnésium secondaire génère de la crasse et des résidus de creuset, qui ne peuvent pas être recyclés et qui doivent donc être digérés dans de l'eau pour donner un hydroxyde de magnésium inerte, avec des éléments d'alliage, sous la forme d'une boue hydratée. Par tonne de métal, environ 0,5 tonne de boue est générée, celle-ci contenant environ 50 % d'eau.

10.2.4 Sous-produits, résidus et déchets issus du procédé

La production des alcalins et des métaux alcalins est liée à la génération de plusieurs sous-produits, résidus et déchets, qui sont également listés dans le catalogue européen des déchets (Décision du conseil 94/3/EEC). Les résidus spécifiques au procédé les plus importants issus de la production des alcalins et des métaux alcalins sont listés ci-après.

Métal produit	Résidu	Source	Quantité
Sodium	gâteau de filtration	étape de nettoyage du sodium	n.d.
	sédiment	réservoirs de stockage (N 1)	n.d.
	chlore	produit sous la forme d'un sous-produit	1,6 t de Cl/t de métal
Lithium	solution mère	cristallisation	n.d.
	anodes usagées	cellule électrolytique	n.d.
Calcium	aluminate de calcium	four sous vide	n.d.
	garnissages du four usagés	four sous vide	n.d.
Strontium	aluminate de strontium	four sous vide	n.d.
	garnissages du four usés	four sous vide	n.d.
Magnésium (procédé électrolytique)	boue et gravier	extinction de la dolomie	0,05 t/t de MgO
	Laitier	four de chloration	0,14 t/t de métal
	boue contenant de la dioxine	traitement de l'eau	0,01/t de métal
	boue contenant du métal	électrolyse et halle de coulée	0,04 t/t de métal
Magnésium (procédé thermique)	poussières de dolomie	sous-produit issu de la calcination de la dolomie	0,28 t/t de MgO
	électrolyte en excès	sous-produit issu de l'électrolyse	0,18 t/t de métal
	dolomie et poussières sous filtre	tamissage de la dolomie et de la roche dolomitique	1 t/t de métal
	Laitier granulé	four de réduction sous vide	2,5 - 3 t/t de métal
	Laitier fin et sec		0,5 - 0,7 t/t de métal
	laitier humide		0,3 - 0,5 t/t de métal
	laitier	étape d'affinage	0,3 t/t de métal
Notes : (N 1) Les sédiments provenant des réservoirs de stockage sont brûlés sur une sole ouverte et les fumées sont collectées et épurées dans un laveur humide à deux étages, déversés dans un troisième étage en utilisant du HCl, qui traite également les fumées issues du lavage du gâteau de filtration n.d. = données non disponibles			

Tableau 10.7 : Résidus lors de la production des alcalins et des métaux alcalins

10.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les États membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et les procédés associés.

Les procédés de manutention et de prétraitement des matières premières et les systèmes de régulation et de dépollution du procédé sont particulièrement pertinents. La régulation des cellules électrolytiques et des paramètres de fonctionnement du four et la prévention des émissions fugitives provenant des cellules électrolytiques, des fours, des procédés de coulée, sont également importants. Les techniques utilisées par d'autres secteurs sont également applicables, en particulier celles liées à la collecte, à la manutention et à l'épuration du chlore gazeux et à la production d'hypochlorite de sodium en utilisant deux laveurs en série. Ces techniques sont traitées dans le document de référence sur les MTD pour l'industrie du chlore-soude, auquel il faut également faire référence.

10.3.1 Matériaux, stockage et manutention

Les matières premières utilisées pour la production des alcalins et des métaux alcalins sont le chlorure de sodium, le carbonate de lithium et de strontium etc. la castine, la dolomite, la magnésite et les réducteurs, par exemple la poudre d'aluminium. L'impact environnemental principal par le stockage et la manutention de ces matériaux est représenté par les émissions de poussières, qui se produisent parfois sous forme d'émissions fugitives de poussières.

Les matières premières sont de préférence stockées et manipulées à l'intérieur où des fûts, des silos, des bennes et des trémies fermés sont utilisés pour empêcher les émissions fugitives dans l'environnement ainsi que dans l'espace de travail. La castine et la dolomite peuvent également être stockées sous forme de tas où les mesures appropriées contre la génération de poussières doivent être prises.

Des convoyeurs et systèmes de transfert fermés sont utilisés pour la manutention des matériaux fins et pulvérulents, où un équipement d'extraction et de filtration est utilisé pour les points de livraison où se forment beaucoup de poussières. L'air chargé de poussières provenant des silos, des convoyeurs fermés et des systèmes de chargement est traité en utilisant des filtres à manches, qui peuvent être surveillés en mesurant la perte de charge pour réguler le mécanisme de décolmatage. Certaines usines utilisent des concasseurs ou un équipement d'agglomération et de granulation pour obtenir la taille souhaitée du matériau de chargement. Les filtres à manches nettoient l'air d'aspiration des concasseurs et de l'équipement d'agglomération.

10.3.2 Techniques de prétraitement

La production du métal de magnésium est partiellement basée sur la dolomie calcinée et la magnésite comme matière première. La calcination peut être effectuée dans des fours rotatifs ou verticaux. Différents combustibles, par exemple le gaz naturel, peuvent chauffer les fours. Une nouvelle technologie utilisée pour la calcination de la dolomie est la calcination par suspension de gaz (GSC) qui est présentée dans l'exemple suivant.

EXEMPLE 10.01 PROCÉDE DE CALCINATION PAR SUSPENSION DE GAZ POUR LA CALCINATION DE LA DOLOMITE ET DE LA MAGNESITE COMME PROCÉDE DE PRETRAITEMENT LORS DE LA PRODUCTION DE METAL DE MAGNESIUM

Description : - Le procédé GSC est constitué par plusieurs étapes de procédé. La première étape est le séchage de la dolomite dans un sécheur flash utilisant les gaz sortants chauds provenant de l'installation de GSC. Le matériau sec est alors concassé dans un concasseur à cônes spécial. La charge pulvérisée est injectée dans la colonne montante entre le second et le premier cyclone de pré-chauffage. Quand il entre dans le conduit de la colonne montante, le matériau tombe initialement à contre-courant par rapport au effluents gazeux chauds. Après pré-chauffage dans le quatrième cyclone, le matériau atteint la température de calcination et est dirigé vers le four de calcination où la calcination complète a lieu. Le four de calcination est grossièrement un cylindre vertical où l'air, le combustible et le matériau entrent par le bas et d'où les gaz émis transportant le matériau calciné sortent par le haut. Les particules calcinées sont transportées par le flux gazeux vers un cyclone de séparation à partir duquel les gaz chauds passent dans le préchauffeur tandis que le produit est rejeté par gravité vers le refroidisseur. Le procédé est régulé par un système d'instrumentation et de régulation informatisé de haute technicité.

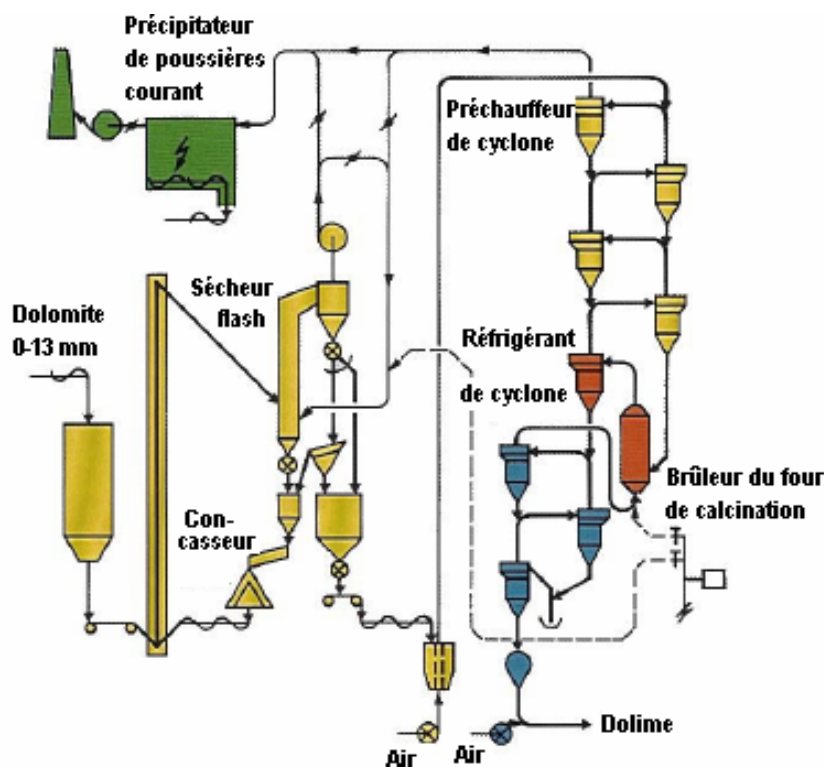


Figure 10.8 : Four de calcination à suspension de gaz [FIGURE : préchauffeur de cyclone → cyclone de préchauffage, réfrigérant de cyclone → cyclone refroidisseur, dolime → dolomie]

Principaux bénéfices environnementaux : - Réduction de la consommation de combustible par rapport aux autres systèmes, en raison de l'utilisation intensive de l'énergie thermique du produit et des effluents gazeux.

Données opérationnelles :

Consommation de combustible	1 145 kcal/kg
Consommation d'énergie	33 kWh/t de produit

Le niveau d'émission de poussières en utilisant un filtre électrostatique est inférieur à 30 mg/Nm³

Effets croisés : - Pas d'effets croisés

Aspects économiques : - Le procédé GSC comporte des frais d'exploitation inférieurs aux autres systèmes

Applicabilité : - Applicable aux usines nouvelles et existantes (également aux autres procédés de production où la calcination a lieu, par exemple dans la production de chaux).

Documents de référence : [tm 150, F.L. Schmidt 1992]

10.3.3 Activités principales

La partie la plus importante de la production des métaux alcalins et alcalino-terreux est la cellule électrolytique pour la production électrolytique et le four sous vide utilisé pour le procédé de réduction thermique. Du fait du petit nombre de producteurs et par conséquent du petit nombre d'usines en activité dans l'Union européenne et sur la planète, les techniques présentées comme techniques appliquées sont également les techniques prises en compte dans la détermination des MTD.

Tout le magnésium électrolytique est produit par électrolyse du chlorure de magnésium, dans la plupart des cas du chlorure exempt d'eau (anhydre). Ainsi, il y a deux étapes principales dans le procédé :

- La production de chlorure de magnésium anhydre à partir des matières premières, et ;
- l'électrolyse du chlorure de magnésium.

Il y a un certain nombre de procédés pour la préparation du chlorure anhydre. L'exemple suivant donne la description d'un « procédé de déshydratation » récemment développé et mis en œuvre avec succès.

EXEMPLE 10.02 PRODUCTION DE MAGNESIUM PRIMAIRE UTILISANT LE PROCEDE DE DESHYDRATATION

Description générale : Le procédé de déshydratation de la saumure de MgCl_2 développé par Norsk Hydro a été mis en œuvre dans l'usine Norsk Hydro Canada ayant démarré son activité en 1989. Le procédé est décrit dans ce qui suit et illustré sur le schéma de principe joint.

L'installation de déshydratation de la saumure de MgCl_2 : L'installation produit de la saumure de MgCl_2 en dissolvant une roche de magnésite dans de l'acide chlorhydrique (HCl). Après purification pour enlever les impuretés dissoutes telles que le fer et l'aluminium, la saumure est soumise à une évaporation et à une cristallisation pour créer un matériau granulaire (« pépites ») adéquat pour les techniques de séchage sur lit fluidisé. Les pépites sont ensuite séchées en deux étapes, tout d'abord par de l'air chaud puis par du HCl gazeux, pour produire un produit de MgCl_2 essentiellement anhydre.

Electrolyse et synthèse de l'HCl : Les cellules d'électrolyse à forte intensité de courant électrique du modèle Hydro fonctionnent à environ 400 kA. Elles sont alimentées sur une base continue par des pépites de MgCl_2 anhydres provenant de l'installation de déshydratation. Le métal de Mg liquide est retiré des cellules par intermittence et transporté dans des cuves fermées vers la halle de coulée.

Le chlore gazeux formé dans le procédé d'électrolyse est recyclé par réaction avec de l'hydrogène pour produire l'acide chlorhydrique utilisé dans l'étape de dissolution de la magnésite. L'énergie est récupérée à partir de cette étape de synthèse de l'HCl sous la forme de vapeur d'eau générée.

Affinage, alliage et coulée : Dans la halle de coulée, le métal de magnésium est raffiné, allié et coulé pour former des produits sous forme de lingots.

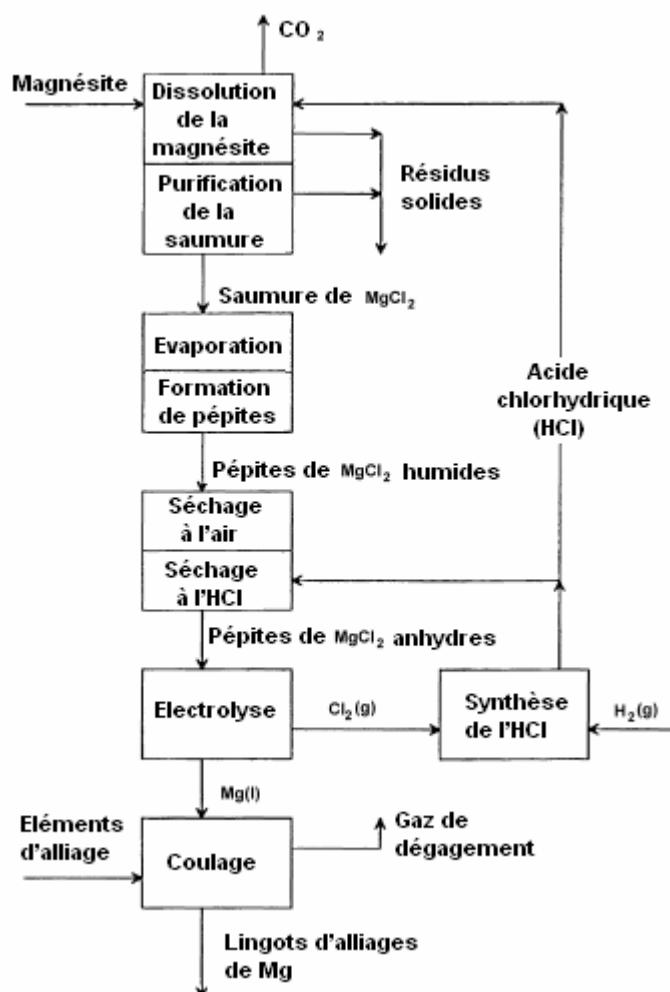


Figure 10.9 : Schéma de principe pour le procédé de déshydratation pour la production de magnésium primaire [coulage → coulée]

Performance environnementale : Les données de performance environnementale typique obtenues sont les suivantes :

Émissions dans l'air :

Poussières	0,4	kg/t de Mg
SO ₂	< 0,2	"
NOx	2	..."
Cl ₂ + HCl	< 1	..."
SF ₆	0,5	..."
Dioxines ¹	< 1 0	µg/t de Mg

Émissions dans l'eau :

Hydrocarbures chlorés ²	< 0,01	g/t de Mg
Dioxines ¹	< 0,1	µg/t de Mg

¹ Somme des PCDD et des PCDF exprimée en équivalents TCDD.

² Somme de l'hexa- et du penta-chlorobenzène et de l'octachlorostyrène.

Applicabilité : Nouvelles usines

10.3.4 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques utilisées pour le captage des fumées et la dépollution discutées dans le Chapitre 2 de ce document sont les techniques à prendre en compte pour la production des alcalins et des métaux alcalins. Le filtre à manches et les laveurs humides, et également les laveurs à multiples étages sont normalement utilisés pour le traitement des effluents gazeux. L'air de ventilation provenant d'une cellule où le métal de sodium est produit peut être extrait en utilisant un laveur venturi à deux étages et une tour à garnissage en utilisant de la soude caustique pour enlever le chlore.

Comme illustré dans l'exemple suivant, les effluents gazeux provenant du four de chloration pour la production de magnésium sont traités dans une série de laveurs humides et de filtres électrostatiques avant d'être finalement soumis à une incinération dans une unité de post-combustion. Le chlore gazeux formé par l'électrolyse du magnésium est traité dans un filtre à manches afin d'éliminer les sels entraînés avant d'être recyclé dans l'étape de chloration.

EXEMPLE 10.03 TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX CONTENANT DES DIOXINES ET DES HYDROCARBURES CHLORES

Description :

Description générale : - Les effluents gazeux provenant des fours de chloration dans l'usine de production de magnésium contiennent du Cl_2 et de l' HCl , et également des dioxines et des hydrocarbures chlorés (HCC). Les effluents gazeux sont traités dans une série de laveurs humides pour éliminer le Cl_2 et l' HCl , puis dans des filtres électrostatiques humides pour éliminer les aérosols du gaz, avant d'être finalement soumis à une incinération. Du SO_2 gazeux est ajouté aux effluents gazeux entre les étapes de lavage pour convertir le Cl_2 en HCl et ainsi augmenter l'efficacité d'épuration. L'eau issue du traitement des effluents gazeux est transférée dans une installation de traitement de l'eau.

L'installation d'incinération : - Les effluents gazeux après le lavage contiennent toujours des quantités inacceptables de dioxines et de HCC. Ils sont donc soumis à un traitement final d'incinération, où les composés organiques volatils, y compris les dioxines et les HCC, sont détruits.

L'installation d'incinération possède cinq chambres verticales remplies de grès céramique pour l'échange de chaleur, connectées par des vannes de régulation du débit pour obtenir une récupération efficace de la chaleur. Le gaz entrant est amené vers des chambres dans le modèle « admission » et chauffé jusqu'à la température de réaction avant d'entrer dans la chambre de combustion horizontale en haut des chambres. Dans la chambre de combustion, le contenu en CO du gaz (environ de 1 à 2 %) est brûlé conjointement avec le gaz combustible fourni via trois brûleurs à gaz pour garder la température dans la chambre de combustion au-dessus de 800 °C.

Le gaz traité est alors amené à travers des chambres en mode « évacuation » pour récupérer son contenu calorifique pour chauffer le gaz entrant après connection des chambres. Le gaz traité est alors amené vers la cheminée.

Principaux bénéfices environnementaux : Réduction importante des hydrocarbures chlorés et des dioxines. Récupération de l'énergie thermique qui est générée dans la chambre de combustion de l'installation d'incinération.

Efficacités de la destruction obtenues :

Hydrocarbures chlorés	99,9 % (efficacité totale)
Dioxines	99,9 % (efficacité totale)
CO	100 %

Concentration des produits sortants :

Hydrocarbures chlorés	0,01 mg/Nm ³
Dioxines	0,8 ng/Nm ³

Hydrocarbures chlorés comme somme de l'hexa- et du penta-chlorobenzène et de l'octachlorostyrène.
Dioxines comme somme des PCDD et des PCDF exprimée en équivalents TCDD.

Données opérationnelles pour l'installation d'incinération :

Capacité volumique :	70 000 Nm ³ /h
Température de la chambre de combustion :	Au-dessus de 800 °C
Temps de séjour dans la chambre de combustion :	Minimum 2 secondes

Consommation d'énergie (externe) :

Gaz combustible	30 000 GJ/a
-----------------	-------------

Effets croisés :- Dans les laveurs, les dioxines et les hydrocarbures chlorés sont transférés du compartiment air au compartiment eau, un traitement supplémentaire de l'eau est donc nécessaire.

Aspects économiques : - Non disponibles

Applicabilité : - Toutes les usines nouvelles et existantes

Documents de référence : [tm 203, Hydro Magnésium, 1999]

10.3.5 Régulation du procédé

Les principes de régulation du procédé discutés dans le Chapitre 2 sont applicables aux procédés de production utilisés dans ce groupe. Des techniques de régulation informatisées peuvent être utilisées pour la plupart des étapes du procédé et les différentes voies de production.

10.3.6 Opérations post-four

Les alcalins et les métaux alcalins sont souvent vendus sous forme de lingots, ce qui est le cas pour le magnésium ou dans les profilés de différentes tailles. Les lingots de métal sont fabriqués en coulant le métal liquide dans des moules où le métal doit être protégé d'une ré-oxydation. Les métaux alcalins tels que le sodium sont également comprimés sous forme de billettes métalliques.

EXEMPLE 10.04 INSTALLATION D'EXTRUSION POUR LA PRODUCTION DE BILLETES DE METAL DE SODIUM

Description : - Le métal est alimenté dans une extrudeuse à double vis, qui est refroidie d'une manière telle que la température tombe légèrement sous le point de fusion juste avant la filière d'extrusion. Les billettes de métal de sodium produites peuvent être coupées par un dispositif de coupe automatique sous atmosphère protectrice.

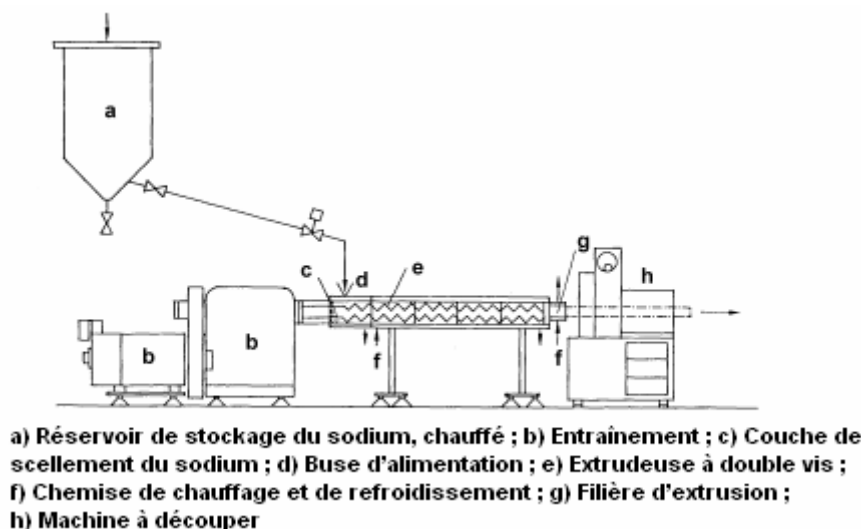


Figure 10.10 : Schéma d'une installation d'extrusion pour la production de billettes de métaux alcalins

Principaux bénéfices environnementaux : - La formation d'impuretés par réaction avec l'air et l'humidité atmosphérique est évitée

Données opérationnelles : - Non disponibles

Effets croisés : - Aucune réaction avec l'air et l'humidité atmosphérique

Aspects économiques : - Non disponibles

Applicabilité : - Toutes les usines nouvelles et existantes

Documents de référence : - [tm 107, Ullmanns, 1996]

10.3.7 Traitement de l'eau

Il s'agit d'une question spécifique à chaque site. D'après les informations collectées, les systèmes de traitement existants sont très performants. Toutes les eaux usées doivent être traitées pour enlever les métaux et les solides dissous ainsi que les dioxines et les hydrocarbures chlorés. L'élimination des dioxines et des hydrocarbures chlorés de l'eau de lavage est nécessaire. L'exemple suivant présente donc un exemple d'installation de traitement des eaux usées qui traite les dioxines et les hydrocarbures chlorés de l'eau de lavage.

EXEMPLE 10.05 TRAITEMENT DES EAUX USEES CONTENANT DES DIOXINES ET DES HYDROCARBURES CHLORES

Description : - Les écoulements d'eaux usées contaminées provenant de diverses parties de l'usine de production de magnésium, y compris l'eau issue du traitement des effluents gazeux issus de la chloration, sont traités dans une installation de traitement des eaux usées pour réduire la teneur en dioxines et en hydrocarbures chlorés de plus de 99 %.

L'installation de traitement de l'eau : - L'installation de traitement des eaux usées qui est montrée sur la figure suivante est basée sur trois différentes opérations unitaires

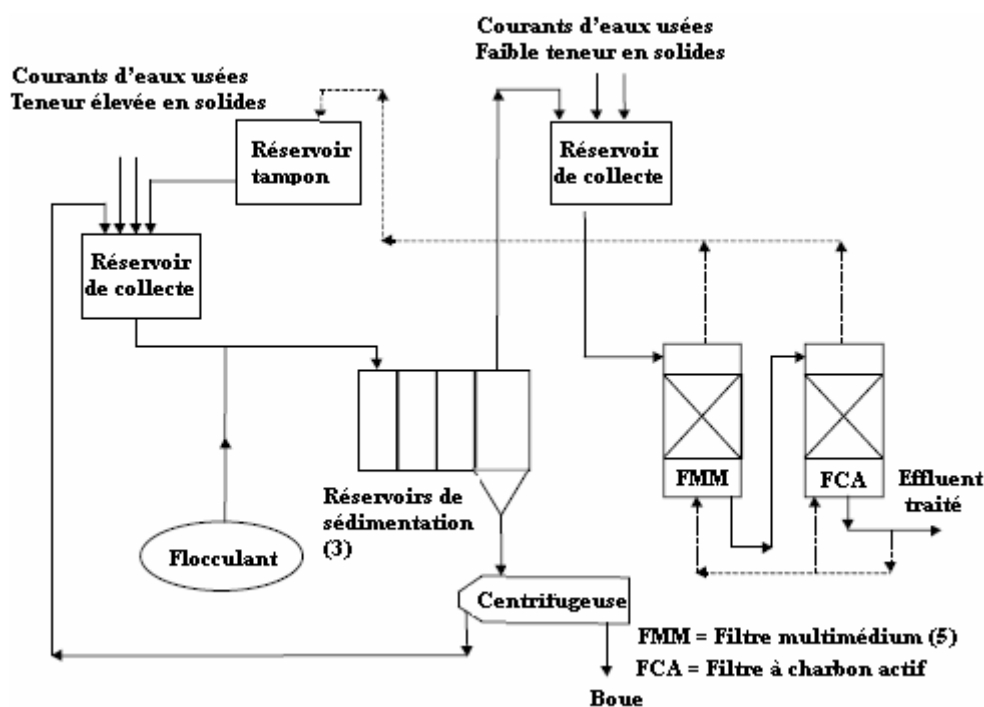


Figure 10.11 : Installation de traitement pour l'épuration des eaux usées contaminées par des dioxines et des hydrocarbures chlorés [courants → écoulements]

Les écoulements d'eaux usées ayant des concentrations élevées de particules solides sont collectés et les solides sont séparés par l'utilisation d'une flocculation et d'une sédimentation. La boue provenant des unités de sédimentation est déshydratée dans une centrifugeuse jusqu'à une teneur en eau d'environ 50 %. Les solides issus du traitement de l'eau, contenant des dioxines et des hydrocarbures chlorés, sont incinérés hors site.

Le volume plus important des écoulements d'eaux usées ayant des concentrations de particules solides faibles est traité dans des filtres multimédia (filtres à sable), en enlevant les particules jusqu'à 1 μm . Les solides sont périodiquement relavés dans les unités de sédimentation.

La dernière étape dans le procédé de traitement est l'étape de finition sur du charbon actif. Les petites particules et la partie des dioxines et des hydrocarbures chlorés soluble dans l'eau sont adsorbées sur du charbon actif. Le carbone est remplacé périodiquement, et le carbone usagé est incinéré hors site.

L'installation de traitement des eaux usées fait partie intégrante de l'installation de chloration. L'installation est commandée à partir d'une salle de commande centrale sans que des opérateurs supplémentaires soient nécessaires. Le travail périodique est lié à la manutention des boues, à la maintenance et au remplacement du charbon actif.

Principaux bénéfices environnementaux :

Efficacités obtenues :

Hydrocarbures chlorés	99,5 % ou mieux
Dioxines	99,5 % ou mieux

Concentration dans l'eau en sortie :

Hydrocarbures chlorés	0,15 mg/Nm ³ d'eau
-----------------------	-------------------------------

Dioxines

100 ng/m³ d'eau

Hydrocarbures chlorés comme somme de l'hexa- et du penta-chlorobenzène et de l'octachlorostyrène.
Dioxines comme somme des PCDD et des PCDF exprimée en équivalents TCDD.

Données opérationnelles :

Pour l'installation de traitement de l'eau

Capacité volumique : 600 m³/h

Les matériaux de construction
permettent aux eaux usées acides
d'être traitées à un pH aussi bas que
1,5

Boue générée : Environ 350 t/a (50 % d'eau)

Effets croisés : - La boue provenant de l'installation de traitement des eaux usées doit être incinérée, ce qui produit là encore des émissions dans l'air et dans les sols.

Aspects économiques : - Non disponibles

Applicabilité : - Toutes les usines nouvelles et existantes

Documents de référence : - [tm 204, Hydro Magnésium 1999]

Les techniques listées dans le Chapitre 2 sont les techniques à prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

10.3.8 Réduction de résidus du procédé

Les procédés dont on a discuté précédemment comme étant des techniques appliquées discutés dans la section sur les niveaux actuels d'émission et de consommation sont toutes des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. Le facteur le plus important pour réduire l'impact environnemental des résidus rejetés en tant que déchets sont les mesures intégrées au procédé qui entraînent la génération de résidus en moindre quantité. Si la quantité de résidus du procédé est minimisée en utilisant des mesures primaires, il faut recycler ou réutiliser les résidus restant autant que possible. Les matières chargées spécifiques influenceront le choix du procédé final. Il faut également prendre en compte les techniques discutées dans le Chapitre 2 en liaison avec ces procédés.

10.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêtera une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production des métaux alcalins et alcalino-terreux : le chlore, l'HCl, la dioxine, le SF₆, les poussières dans les fumées, le CO₂, le SO₂, les eaux usées, les résidus tels que la boue, l'aluminate, les poussières sous filtre et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques

techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux États membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifiques devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

10.4.1 Stockage et manutention des matériaux

Les conclusions tirées pour les meilleures techniques disponibles pour la manutention et le stockage des matériaux sont montrées dans la Section 2.17 de ce document et sont applicables aux matériaux dans ce chapitre.

10.4.2 Sélection du procédé

10.4.2.1 Techniques de prétraitement

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour le prétraitement des matières premières seront partiellement les MTD pour ce secteur. Quand un procédé de calcination est nécessaire pour la préparation de la matière première, par exemple pour la calcination de la dolomie, la technique employant un four de calcination par suspension de gaz (GSC) est utilisée de façon avantageuse. Le niveau d'émission associé pour les poussières est inférieur à 30 mg/Nm³ si les effluents gazeux chargés de poussières provenant du four de calcination sont traités en utilisant un électrofiltre et à 5 mg/Nm³ en utilisant un filtre à manches. En raison des coûts d'investissement élevés pour l'installation d'un tel système de four de calcination, l'installation avait une certaine capacité de production.

10.4.2.2 Activités principales

Selon les différents alcalins et métaux alcalins produits, l'impact environnemental de la production est largement influencé par le procédé métallurgique utilisé. Selon les métaux produits, les procédés métallurgiques suivants sont utilisés dans l'industrie et considérés comme étant les MTD pour ce secteur.

Métal produit	Procédé	Unité de production	Technique de dépollution	Commentaires et considérations
Sodium	Électrolyse du chlorure de sodium fondu	Cellule électrolytique (Cellule Downs)	Laveur humide pour le traitement de l'air de la chambre de la cellule	<ul style="list-style-type: none"> Le niveau associé possible de chlore dans l'air de ventilation est inférieur à 1 mg/Nm³ ; Des alarmes spécifiques au chlore doivent être déployées dans la halle d'électrolyse et dans l'installation de traitement du chlore.
Lithium	Électrolyse du lithium et du chlorure de potassium	Cellule électrolytique (Cellule Downs)	Laveur humide pour le traitement de l'air de la chambre de la cellule	<ul style="list-style-type: none"> Le niveau associé possible de chlore dans l'air de ventilation est inférieur à 1 mg/Nm³ ; Le chlore produit par la halle d'électrolyse est collecté sous vide partiel puis est absorbé dans de la soude caustique pour produire de l'hypochlorite de sodium ; Des alarmes spécifiques au chlore doivent être déployées dans la halle d'électrolyse.
Potassium	Réduction du chlorure de potassium avec du sodium métal	Colonne de réaction	Laveur humide	<ul style="list-style-type: none"> Il n'existe aucune information disponible sur une usine produisant du métal de potassium dans l'Union européenne
Calcium	Réduction thermique de l'oxyde de calcium avec de l'aluminium	Four électrique sous vide		<ul style="list-style-type: none"> Le métal est condensé dans la partie refroidie du four Il n'y a pas d'émissions importantes issues de l'opération du four
Strontium	Réduction thermique de l'oxyde de strontium avec de l'aluminium	Four électrique sous vide		<ul style="list-style-type: none"> Le métal est condensé dans la partie refroidie du four Il n'y a pas d'émissions importantes issues de l'opération du four
Magnésium	Chloration de l'oxyde de magnésium	Four à cuve de chloration	Laveur humide à multiples étages connecté à un électrofiltre et à une post-combustion. Le procédé peut être combiné à une injection de charbon actif	<ul style="list-style-type: none"> Le procédé de chloration ne peut plus être considéré comme étant une MTD pour les nouvelles usines produisant du magnésium par électrolyse
	Déshydratation de la saumure de MgCl ₂	Évaporation/formation de pépites		<ul style="list-style-type: none"> Les émissions de dioxine sont < 10 µg TEQ /t à la place de 53 µg TEQ /t pour le procédé qui nécessite une étape de chloration. Le procédé de déshydratation de la saumure de MgCl₂ est donc considéré comme étant une MTD pour les nouvelles usines.
	Électrolyse du chlorure de magnésium (N 1)	Cellule d'électrolyse à forte intensité de courant	Filtre à manches pour nettoyer le chlore gazeux formé par électrolyse, qui est alors recyclé vers l'étape de chloration	<ul style="list-style-type: none"> La cellule fonctionne dans la plage de 300 à 400 kA ; La cellule est alimentée avec du chlorure de magnésium liquide par intermittence ou avec du chlorure de magnésium solide sur de façon continue ; Le métal de magnésium liquide est évacué de la cellule de façon intermittente ; La quantité de SF₆ utilisée dans la halle de coulée devrait être réduite autant que possible, et remplacée par une substance moins nocive dès que possible (N1).
	Réduction thermique de l'oxyde de magnésium par du silicium	Four électrique sous vide	Électrofiltre et filtre à manches (humide)	<ul style="list-style-type: none"> Le niveau associé possible de poussières en utilisant un électrofiltre est de 20 à 30 mg/Nm³ ; La quantité de SF₆ utilisée dans la halle de coulée doit être réduite autant que possible, et remplacée par une substance moins nocive quand c'est possible (N1).
Notes : (N 1) En raison du potentiel de réchauffement climatique élevé du SF ₆ , on a rapporté que l'utilisation du dioxyde de soufre pourrait être une alternative.				

Tableau 10.8 : Unités de production considérées comme MTD pour la production d'alcalins et de métaux alcalins

10.4.2.3 Régulation du procédé

Les techniques présentées dans les différentes sections du Chapitre 2 décrivant les possibilités de réguler le procédé par des systèmes informatisés feront partie des MTD pour ce secteur. Les plus importantes sont considérées comme étant.

- La régulation du fonctionnement de la cellule électrolytique pour optimiser les conditions de fonctionnement. Les paramètres clés sont la tension de la cellule, la valeur du pH et la température ;
- La régulation du fonctionnement du four sous vide pour optimiser les conditions de fonctionnement. Les paramètres clés sont la pression et la température en divers endroits du four et du système de manutention des gaz, la concentration en oxygène et en monoxyde de carbone ou en dioxyde de carbone et la pression du système ;
- La régulation du procédé en utilisant des méthodes pertinentes de sorte qu'il soit possible de maintenir les conditions de fonctionnement au niveau optimal et de déclencher des alarmes pour les conditions qui sont en dehors du domaine de fonctionnement acceptable ;
- Il faut former les opérateurs des usines et leur donner des instructions relatives aux procédures de fonctionnement et aux paramètres de régulation corrects ;
- Utilisation d'une bonne maintenance pour les procédés de l'usine, les systèmes de dépollution et autres procédés associés. Il faut adopter un système d'inspection ;
- Pour réduire les risques d'incendie, des détecteurs d'incendie doivent être installés.

10.4.2.4 Opérations post-four

Les techniques présentées en tant que techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD sont également les techniques qui sont considérées comme MTD dans ce secteur. Selon les opérations post-four normalement utilisées, telles que la coulée, le broyage et le tamisage, les MTD sont définies comme suit.

- En raison du potentiel de réchauffement global très important du SF₆ (facteur 23 900 supérieur au CO₂), la quantité de SF₆ utilisée dans la halle de coulée devrait être réduite autant que possible, et remplacée par une substance moins nocive dès que possible ;
- Les différentes étapes de broyage et de tamisage peuvent être fermées et maintenues à une pression légèrement inférieure à celle de l'extérieur ;
- Les installations de concassage et de tamisage peuvent être équipées de cyclones et de filtres à manches pour récupérer les ultrafines ;
- Les ultrafines de métal de calcium et de strontium peuvent être détruites avec de l'eau pour éviter les risques d'incendie. Le produit final sera alors une petite quantité de chaux ;
- Pour réduire les risques d'incendie, les différentes étapes de broyage et de tamisage doivent être isolées les unes des autres relativement à la propagation du feu ;
- Pour prévenir la propagation du feu par le stockage du calcium, un matériau inerte ou des parois de sécurité contre les incendies peuvent séparer les différentes parties du stock ;
- Un volume d'azote est injecté en cas de détection d'incendie.

10.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour les techniques de collecte des effluents gazeux ainsi que les techniques de dépollution de l'air feront partie des MTD pour ce secteur. Selon les techniques à prendre en compte qui sont présentées pour la dépollution de l'air, les MTD pour ce secteur sont considérées comme suit.

- Les filtres à manches sont adéquats pour le traitement de l'air d'aspiration provenant du stockage de la matière première et des dispositifs de manutention. Le niveau associé de concentration de matière particulaire résiduelle pour un filtre à manches est inférieur à 5 mg/Nm^3 . Il faut noter qu'un filtre à manches peut atteindre des niveaux très faibles de poussières, qui dépendent du média filtrant utilisé. Si des cas spéciaux (par exemple conditions relatives à la santé et à la sécurité) requièrent des émissions de poussières très faibles, ceci peut être réalisé en utilisant les filtres à membrane appropriés ;
- Un électrofiltre ou un filtre à manches peut nettoyer les effluents gazeux provenant d'un four de calcination, où les niveaux d'émission de poussières associés sont dans la plage comprise entre 20 et 30 mg/Nm^3 pour un électrofiltre et de 5 mg/Nm^3 pour un filtre à manches ;
- L'air de la halle d'électrolyse (« stife ») doit être traité afin de minimiser l'impact environnemental du chlore et de l'HCl. Des laveurs venturi à multiples étages suivis d'une tour à garnissage utilisant de la soude caustique sont adéquats pour éliminer le chlore. Le niveau de chlore associé est inférieur à 1 mg/Nm^3 ;
- Les effluents gazeux provenant des fours de chloration sont traités dans des laveurs à multiples étages connectés à un électrofiltre humide et à une post-combustion afin de réduire les émissions de dioxines et d'hydrocarbures chlorés dans l'air. L'efficacité totale de la combinaison pour les techniques de dépollution doit être de 99,9 %. Pour obtenir des concentrations de dioxine inférieures dans les effluents gazeux, une injection supplémentaire de charbon actif peut être prise en compte. L'effluent provenant du laveur et du électrofiltre humide doit être traité afin de minimiser les émissions de dioxines et d'hydrocarbures chlorés dans l'eau.

Le tableau suivant résume l'émission captée associée à l'utilisation de meilleures techniques disponibles et les techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux.

Polluant	Émissions associées à l'utilisation des MTD	Techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	$< 5 \text{ mg/Nm}^3$	Filtre à manches	Les filtres à manches sont normalement utilisés pour le dépoussiérage des effluents gazeux
	$< 20 - 30 \text{ mg/Nm}^3$	Électrofiltre	Traitement des effluents gazeux provenant d'un four de calcination de la dolomie utilisé dans la production de métal de magnésium
Métaux lourds		Filtre à manches	Les filtres à manches à haute performance (par exemple filtres à membrane) peuvent atteindre de faibles niveaux de métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à la concentration de poussières et à la proportion des métaux faisant partie des poussières.
Cl	$< 1 \text{ mg/Nm}^3$	Laveurs venturi à multiples étages avec ensuite une tour à garnissage utilisant de la soude caustique	Pour le traitement de l'air de la halle d'électrolyse
Dioxines et hydrocarbures	Efficacité totale de	Laveurs à multiples étages connectés à un électrofiltre	Les émissions de dioxine sont $< 10 \text{ } \mu\text{g TEQ /t}$ pour le procédé de déshydratation de la saumure de MgCl_2 à la

issus de la chloration dans la production du Mg	destruction > 99,9 %	humide et à une post-combustion	place de 53 µg TEQ /t pour le procédé qui nécessite une étape de chloration. Le procédé de déshydratation de la saumure de MgCl ₂ est donc considéré comme étant une MTD pour les nouvelles usines.
Note. Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont exprimées comme des moyennes journalières basées sur une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où il n'est pas possible de mettre en œuvre une surveillance continue, la valeur est la valeur moyenne sur la période d'échantillonnage. Pour le système de dépollution utilisé, les caractéristiques du gaz et des poussières seront prises en compte dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte utilisée.			

Tableau 10.9 : Niveaux d'émission dans l'air associés à l'utilisation de MTD

10.4.4 Eaux usées

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour le traitement des effluents et la réutilisation de l'eau feront partie des MTD pour ce secteur. D'après les techniques à prendre en compte qui sont présentées pour le traitement de l'eau, les MTD pour ce secteur sont considérées comme suit :

- Lors de la production du métal de magnésium, l'effluent de lavage issu de l'étape de chloration doit être traité afin de minimiser les émissions de dioxine et d'hydrocarbures chlorés dans l'eau en utilisant une floculation et une séparation des solides puis une seconde étape de traitement par du charbon actif ;
- Les cycles de l'eau en circuit fermé sont adéquats pour les laveurs humides, les systèmes de refroidissement et les presses de granulation ;
- La purge provenant des cycles de l'eau en circuit fermé doit être traitée pour enlever la matière particulaire et les composés métalliques de l'eau ;
- Il faut recycler et réutiliser les eaux usées traitées autant que possible ;
- Il faut également traiter et analyser les liquides de lavage avant rejet ;
- Confinement des systèmes de drainage des usines où cela est possible et traitement des effluents selon leur teneur avec analyse avant rejet.

10.4.5 Résidus du procédé

Les techniques présentées dans le Chapitre 2 pour la minimisation des déchets feront partie des MTD pour ce secteur et doivent donc être prises en compte afin de choisir la technique ou le mode de fonctionnement de l'installation qui entraîne l'impact environnemental le plus bas. Le facteur le plus important pour réduire l'impact environnemental des résidus rejetés en tant que déchets est représenté par les mesures intégrées au procédé qui entraînent la génération de résidus en moindre quantité. Si la quantité de résidus du procédé est minimisée en utilisant des mesures primaires, il faut recycler ou réutiliser la quantité restante autant que possible.

D'après les procédés qui ont été définis comme étant les techniques appliquées, les modes suivants d'utilisation, de recyclage et de réutilisation sont considérés comme étant les MTD pour ce secteur. Le procédé utilisé et les matières chargées spécifiques influenceront le choix du procédé final.

Métal produit	Résidu	Utilisation, recyclage et réutilisation
Sodium	Gâteau de filtration	<ul style="list-style-type: none"> Le gâteau de filtration est déshydraté puis soumis à une incinération.
	Sédiment	<ul style="list-style-type: none"> Le sédiment est déshydraté puis soumis à une incinération.
	Chlore	<ul style="list-style-type: none"> Le chlore peut être vendu sous en tant que sous-produit.
Lithium	Solution mère	<ul style="list-style-type: none"> La solution mère issue de la cristallisation peut être recyclée.
	Anodes usagées	<ul style="list-style-type: none"> Aucune information sur l'utilisation etc. n'est disponible.
Calcium	Aluminate de calcium	<ul style="list-style-type: none"> L'aluminate de calcium peut être utilisé dans le procédé Bayer pour élaborer l'alumine ; Il peut également être utilisé dans la métallurgie de l'acier et dans l'industrie du ciment.
	Garnissages du four usagés	<ul style="list-style-type: none"> Les garnissages du four sont des briques à haute teneur en alumine, qui peuvent être vendues quand elles peuvent être broyées et réutilisées.
Strontium	Aluminate de strontium	<ul style="list-style-type: none"> L'aluminate de strontium peut être utilisé dans le procédé Bayer pour préparer de l'alumine ; Il peut également être utilisé dans la métallurgie de l'acier et dans l'industrie du ciment.
	Garnissages du four usagés	<ul style="list-style-type: none"> Les garnissages du four sont des briques à haute teneur en alumine, qui peuvent être vendues quand elles peuvent être broyées et réutilisées.
Magnésium (procédé électrolytique)	Boue et gravier	<ul style="list-style-type: none"> Aucune information sur l'utilisation etc. n'est disponible, mais une réutilisation dans l'industrie de la construction pourrait être possible.
	Laitier	<ul style="list-style-type: none"> Aucune information sur l'utilisation etc. n'est disponible, mais une réutilisation dans l'industrie de la construction pourrait être possible.
	Boue contenant de la dioxine	<ul style="list-style-type: none"> La boue contenant de la dioxine peut être incinérée quand les émissions de dioxine doivent être minimisées en prenant les mesures appropriées
	Boue contenant du métal	<ul style="list-style-type: none"> La boue contenant du métal peut être vendue pour la récupération des métaux.
	Poussières de dolomie calcinée	<ul style="list-style-type: none"> Les poussières de dolomie calcinée sont un sous-produit et peuvent être utilisées dans l'industrie des engrais.
	Électrolyte en excès	<ul style="list-style-type: none"> Peut être utilisé comme sel pour les routes.
Magnésium (procédé thermique)	Dolomie et poussières sous filtre	<ul style="list-style-type: none"> La dolomie et les poussières sous filtre peuvent être partiellement utilisées pour des utilisations agricoles.
	Laitier provenant du four	<ul style="list-style-type: none"> Le laitier provenant du four peut être partiellement utilisé dans le substratum des routes ; Le laitier très fin qui reste dans la lingotière peut être réutilisé comme couvercle de poche dans l'industrie de l'acier.
	Laitier issu de l'affinage	<ul style="list-style-type: none"> Aucune information sur l'utilisation etc. n'est disponible, mais une réutilisation dans l'industrie de la construction pourrait être possible.

Tableau 10.10 : Utilisation, recyclage et réutilisation des résidus lors de la production d'alcalins et de métaux alcalins

10.5 Technologies émergentes

Les procédés pour la production des alcalins et des métaux alcalins sont parfois développés directement par la compagnie qui utilise les procédés, les informations sur les techniques émergentes sont donc très limitées. Des recherches ont été effectuées afin de construire de grandes cellules électrolytiques pour la production de métal de lithium et de sodium, ainsi que des systèmes de régulation du procédé, qui sont censés réduire les coûts de main-d'œuvre élevés et augmenter la productivité.

11 PROCÉDES POUR PRODUIRE DU NICKEL ET DU COBALT

11.1 Procédés et techniques appliqués

Le nickel est produit à partir de minerai oxydé (latérite et saprolite) ou sulfuré, environ 60 % du nickel provient de gisements de sulfures et 40 % de gisements d'oxydes. Il existe plusieurs variations dans les procédés utilisés pour produire le nickel à partir de ces minerais et ces variations sont dépendantes de la qualité du concentré et également des autres métaux qui sont présents dans le matériau [tm 94, Ni Expert Group 1998].

Le cobalt est habituellement présent dans les minerais de nickel et de cuivre et est récupéré pendant leur production. L'affinage du sous-produit contenant du Co récupéré est réalisé par une combinaison de procédés gouvernée par la composition du concentré et les caractéristiques physiques et chimiques du produit final. Les minerais d'arséniure de cobalt sont également des sources de cobalt. Ces minerais sont grillés pour enlever la majorité de l'arsenic sous forme d'oxyde d'arsenic [tm 108, Ullmanns 1996]. Le procédé n'est cependant pas utilisé dans l'Union européenne.

Minerai	Type	Ni %	Cu %	Co %
Murrin Murrin	Latérite	1,25		0,08
Cawse	Latérite	1		0,07
Cerro Matoso	Latérite	2,89		
Selebi-Phikwe	Sulfure	0,65	0,75	0,06
Falconbridge, Sudbury	Sulfure	1,7	1,8	0,05
Falconbridge, Raglan	Sulfure	3,2	0,9	0,05
INCO, Copper Cliff	Sulfure	1,55	2	0,04
Outokumpu, Silver Swan	Sulfure	9,8		0,11
Mount Keith	Sulfure	0,6	0	0,01

Tableau 11.1 : Composition de quelques minerais

Le nickel et le cobalt secondaires sont consommés directement sous forme de déchets refondus et autres produits recyclés généralement dans la production de ferro-nickel et d'acier inoxydable [tm 94, Ni Expert Group 1998]. Les autres matériaux secondaires tels que les catalyseurs et les poussières de précipitation sont récupérés dans les procédés de fusion primaire, habituellement dans le four à laitier.

Parce que ces métaux sont très étroitement associés, leurs procédés de production sont traités ensemble autant que possible [tm 94, Ni Expert Group 1998].

11.1.1 Minerais oxydés

Dans les minerais de latérite, le nickel est lié à l'oxyde de fer ou aux composés de silice et il est difficile à valoriser en concentré. La fusion de ces minerais avec une source de carbone dans un four électrique peut être utilisée. Le ferronickel est produit ou une matte de nickel peut être préparée après l'ajout de soufre.

Avant la fusion, le minerai est habituellement préchauffé ou calciné dans un four rotatif [tm 109, UNEP 1993]. Un four électrique est alors habituellement utilisé pour la fusion.

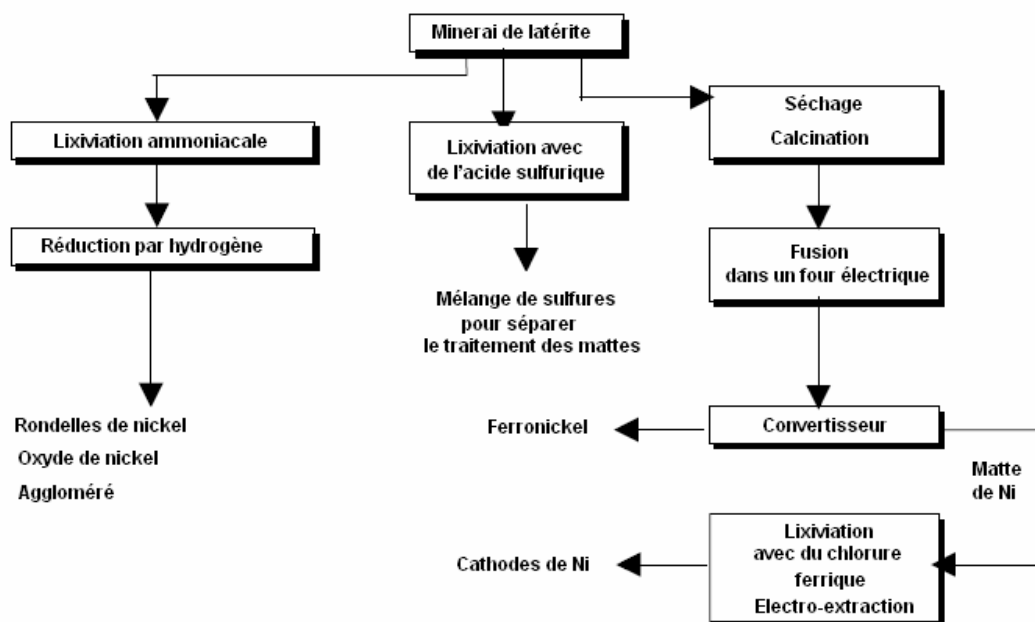


Figure 11.1 : Diagramme générique pour la production du nickel à partir de minerais de latérite

Les minerais de saprolite peuvent être fondus avec du soufre de sorte que l'oxyde de nickel soit converti en une matte de sulfure de nickel et que le fer est enlevé sous forme de laitier [tm 109, UNEP 1993]. La matte est traitée de la même manière que la matte produite à partir des minerais sulfurés.

La fusion pour former du ferronickel représente une part importante de la production de nickel à partir des minerais de latérite, ces procédés sont discutés dans la section relative aux ferroalliages. La lixiviation de la latérite avec de l'ammoniac est également utilisée pour extraire le nickel [tm 20, HMIP Ni 1993 ; tm 57, Outokumpu 1997 ; tm 96, Outokumpu 1998] et ce procédé est en train de devenir de plus en plus important. Bien que la conversion de l'oxyde de nickel en nickel impur puis en carbonyle de nickel, qui est volatile, soit utilisée pour produire du nickel raffiné, l'oxyde de nickel est produit à partir de la fusion d'un minerai sulfuré. Les minerais de latérite ont généralement une teneur maximale en nickel de 3 % et ne sont donc pas utilisés directement dans ce procédé.

La lixiviation sous pression des latérites avec de l'acide sulfurique est principalement un procédé simple et direct. La température, la pression et d'autres paramètres peuvent varier d'un cas à l'autre pour donner les meilleures conditions métallurgiques possibles en fonction des minerais et produits en question et d'autres objectifs. La température des autoclaves de lixiviation est habituellement comprise entre 230 et 260 °C et des pressions allant jusqu'à 43 bar sont utilisées. De l'oxygène peut également être utilisé dans le procédé.

La solution résultante est purifiée soit par des méthodes modernes d'extraction par solvants soit par des méthodes traditionnelles de précipitation. Par exemple, le sulfure d'hydrogène est utilisé pour précipiter sélectivement les sulfures de nickel et de cobalt qui sont envoyés vers une étape de récupération supplémentaire des métaux. La solution peut être neutralisée de sorte que le fer précipite. Le nickel et le cobalt précipiteront et subiront une nouvelle lixiviation avec de l'ammoniac.

L'extraction par solvants est utilisée pour séparer les chlorures ou les sulfates de nickel et de cobalt. Le nickel métallique peut être produit par extraction électrolytique et le cobalt peut être précipité sous forme de sulfure de cobalt. En variante, le nickel et le cobalt peuvent être récupérés sous forme de poudres de métal en utilisant une réduction par hydrogène.

11.1.2 Minerais sulfurés

Les minerais sulfurés contenant du nickel peuvent être concentrés, par exemple par flottation, pour augmenter la teneur en nickel. Des concentrés de nickel, contenant généralement de 7 à 25 % de Ni, sont produits, ce qui facilite leur transformation ultérieure. Les concentrés de nickel sont habituellement fondus en milieu oxydant pour oxyder les sulfures de fer, qui avec les autres matériaux de la gangue, forment un laitier de silicate de fer. Le four de fusion flash Outokumpu est utilisé en Europe ; les fours de fusion flash et les fours électriques ou à cuve Outokumpu et INCO sont utilisés ailleurs dans le monde.

Le nickel est récupéré sous la forme d'une matte de sulfure contenant de 35 à 70 % de Ni, de Co et de Cu. La matte peut être traitée dans un convertisseur Pierce Smith ou en variante, elle peut être granulée ou refroidie lentement avant une étape de récupération hydrométallurgique [tm 142, Finlande N1 1999]. L'étape du convertisseur n'est pas utilisée en Europe au moment de la rédaction de ce document.

Les composés importants des mattes de nickel sont le cobalt, le cuivre et les métaux précieux. Le laitier produit pendant la fusion contient également un métal récupérable et est traité dans un four électrique pour produire davantage de matte de nickel. Celle-ci peut être granulée et traitée séparément [tm 94, Ni Expert Group 1998 ; tm 96, Outokumpu 1998]. Les matériaux de deuxième fusion sont parfois récupérés dans le four électrique.

La figure suivante donne une vue d'ensemble des options du procédé.

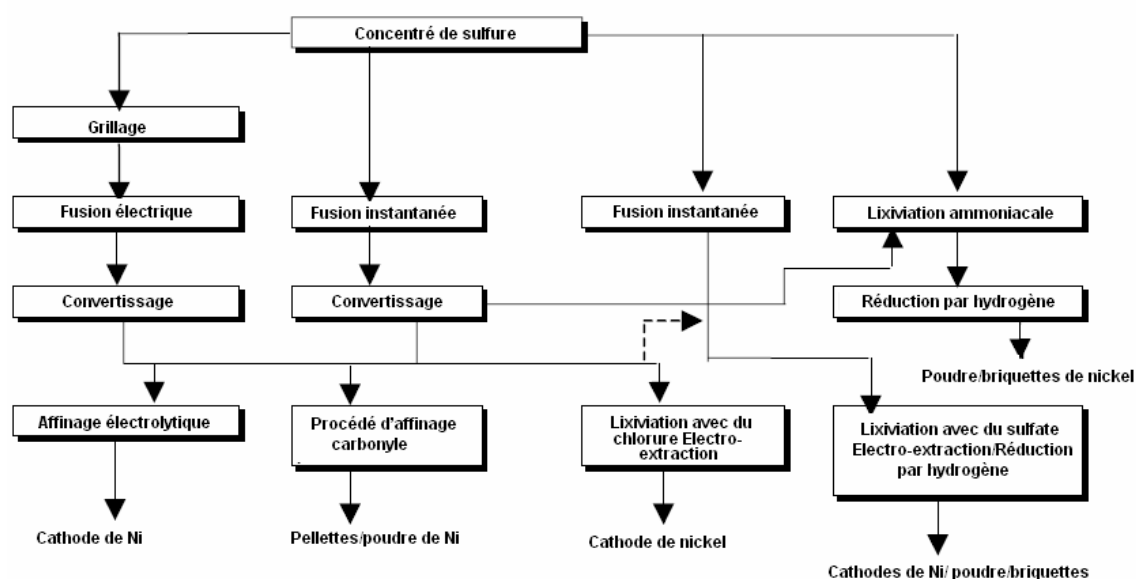


Figure 11.2 : Schéma générique de succession des opérations pour la production du nickel à partir de concentrés de sulfure [instantané → flash]

11.1.2.1 Procédé de fusion flash conventionnel

Les procédés de fusion conventionnels sont utilisés pour enlever le fer et les autres matériaux de gangue des concentrés de sulfure pour produire une matte de nickel. En Europe, seul le four de fusion instantanée Outokumpu est utilisé.

Dans le monde, il y a cinq autres fours de fusion qui utilisent ce procédé. Deux parmi ceux-ci utilisent un four de fusion instantanée conçu par Western Mining Corporation, où les fours de fusion et de traitement du laitier ont été construits ensemble pour former une seule unité de plus grande taille.

Il y a des différences de fonctionnement entre les fours de fusion. La différence la plus visible est la qualité de la matte mais des variations de la composition de la matière première entraînent également quelques différences. Le diagramme générique est montré ci-dessous.

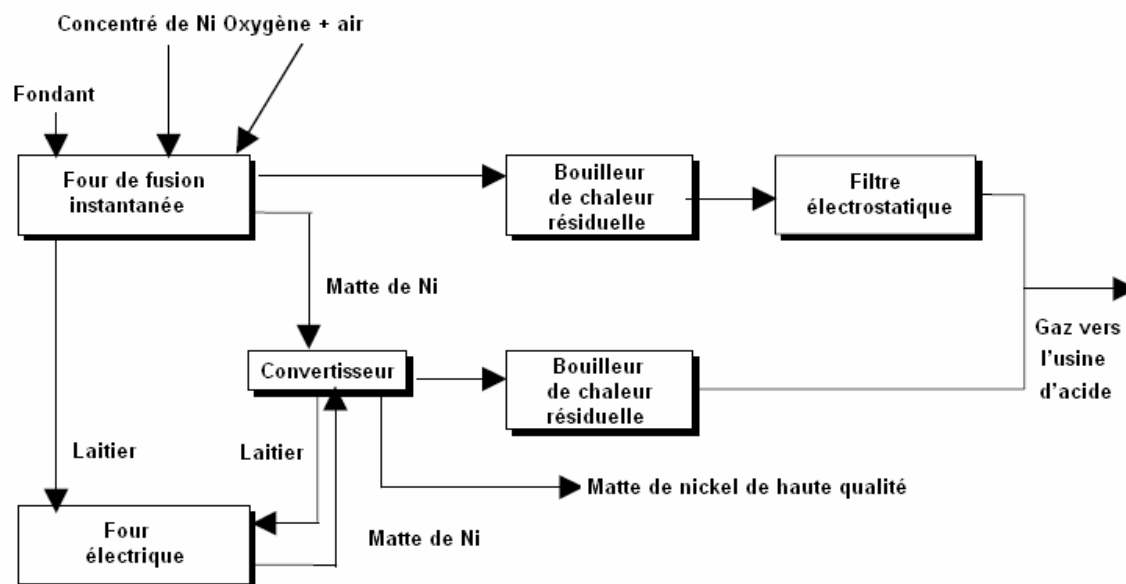


Figure 11.3 : Fusion instantanée conventionnelle [bouilleur de chaleur résiduelle → chaudière de récupération]

Les développements les plus récents du procédé ont exploité le concept consistant à séparer le traitement des mattes produites pendant la fusion et le traitement du laitier.

Le procédé Direct Outokumpu Nickel (procédé DON) utilise un four de fusion instantanée Outokumpu avec de l'air enrichi en oxygène et produit une matte de cuivre-nickel ayant une teneur en métal de ~75 % de Cu+Ni et de 2 à 6 % de fer. La matte est granulée et broyée avant de passer à l'étape de lixiviation. Le laitier passe par un canal de coulée vers un four électrique de traitement du laitier où il est traité avec du coke pour produire davantage de matte de nickel et un laitier propre destiné à mise en décharge. Les deux mattes ont différentes compositions et sont traitées séparément.

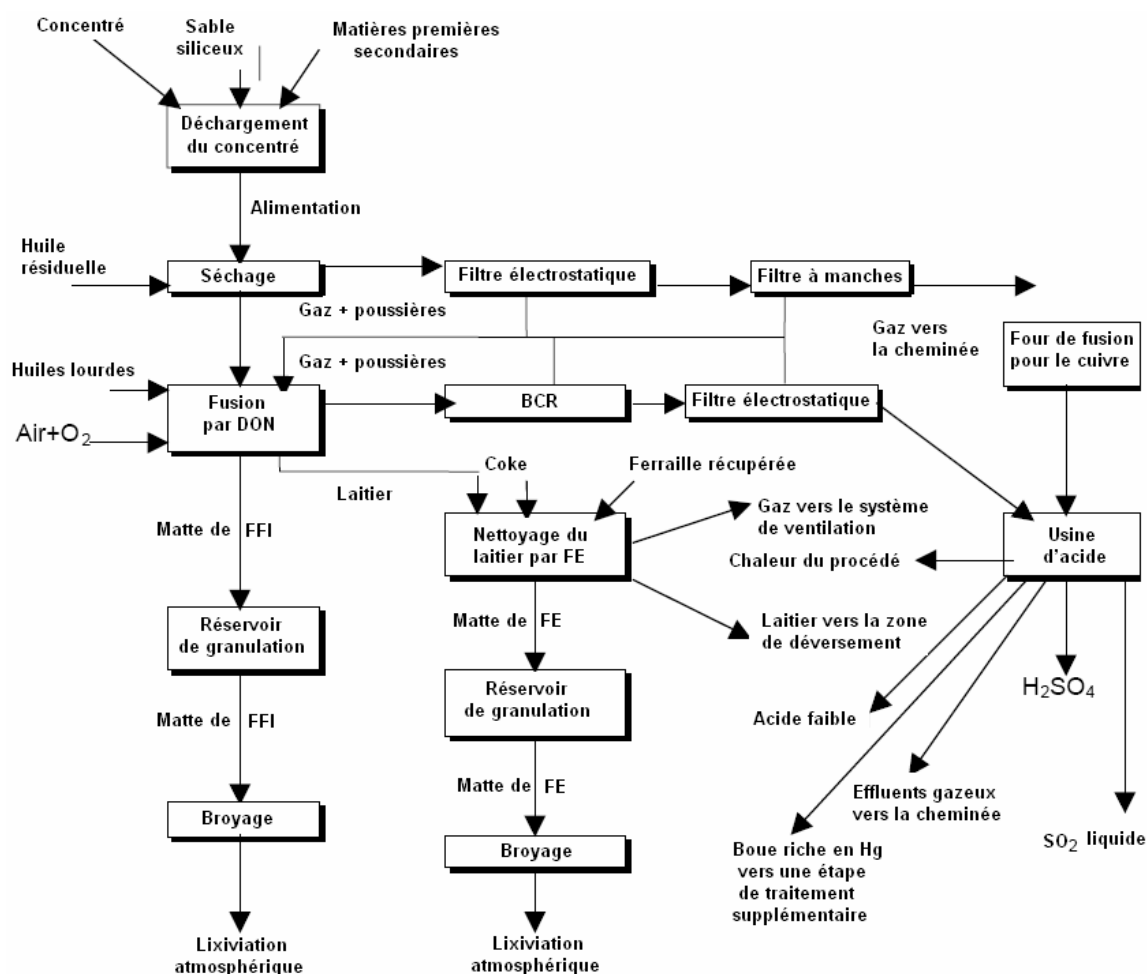


Figure 11.4 : Le procédé DON [huiles lourdes → fuel lourd, zone de déversement → décharge, usine d'acide → usine de production d'acide]

11.1.3 Procédés d'affinage de la matte

Les mattes produites par les procédés de fusion doivent être de nouveau traitées afin de récupérer et d'affiner le contenu métallique. La matte de nickel doit subir un procédé d'affinage en plusieurs étapes pour rejeter le fer et récupérer le cuivre, le cobalt et les métaux précieux. La matte peut être traitée pyrométallurgiquement mais les procédés hydro-métallurgiques sont plus couramment utilisés. Une variété de procédés d'électro-affinage, de lixiviation-réduction et de précipitation est réalisée. Le nickel est récupéré à partir de solutions purifiées par extraction électrolytique ou par réduction par hydrogène.

Le diagramme ci-après montre les voies de traitement génériques.

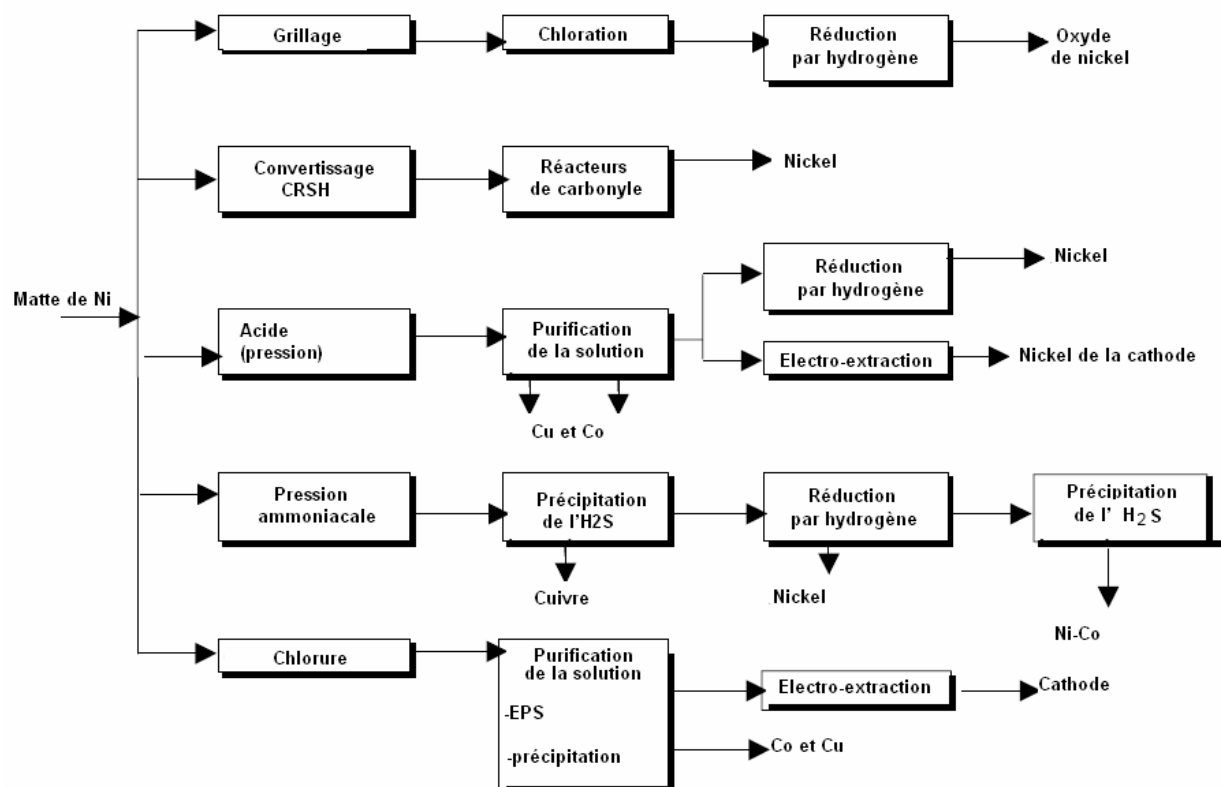


Figure 11.5 : Schéma générique de succession des opérations pour les procédés d'affinage de la matte de nickel [CRSH → TBRC]

11.1.3.1 Lixiviation de la matte avec du chlorure suivie d'une extraction électrolytique

La matte subit une lixiviation dans une solution de chlorure en plusieurs étapes à température et à pression élevées en utilisant du chlore gazeux comme oxydant. Le chlore gazeux est généré dans les cellules d'extraction électrolytique. Le cuivre précipite sous forme de sulfure puis le fer et l'arsenic précipitent sous forme d'hydroxydes et d'arséniates pour purifier le lixiviat. Le sulfure de cuivre est grillé dans un four à lit fluidisé et la calcine résultante subit une lixiviation avec l'électrolyte de cuivre usagé, le cuivre est alors électro-extrait.

Le cobalt est enlevé par extraction par solvants de la solution de chlorure en utilisant un solvant organique et il est électro-extrait. La solution de nickel est alors purifiée davantage en utilisant du chlore pour enlever le plomb et le manganèse et elle est alors électro-extraite dans des cellules à diaphragme utilisant des anodes de titane. Les cellules sont étanches pour récupérer le chlore qui se forme au niveau de l'anode.



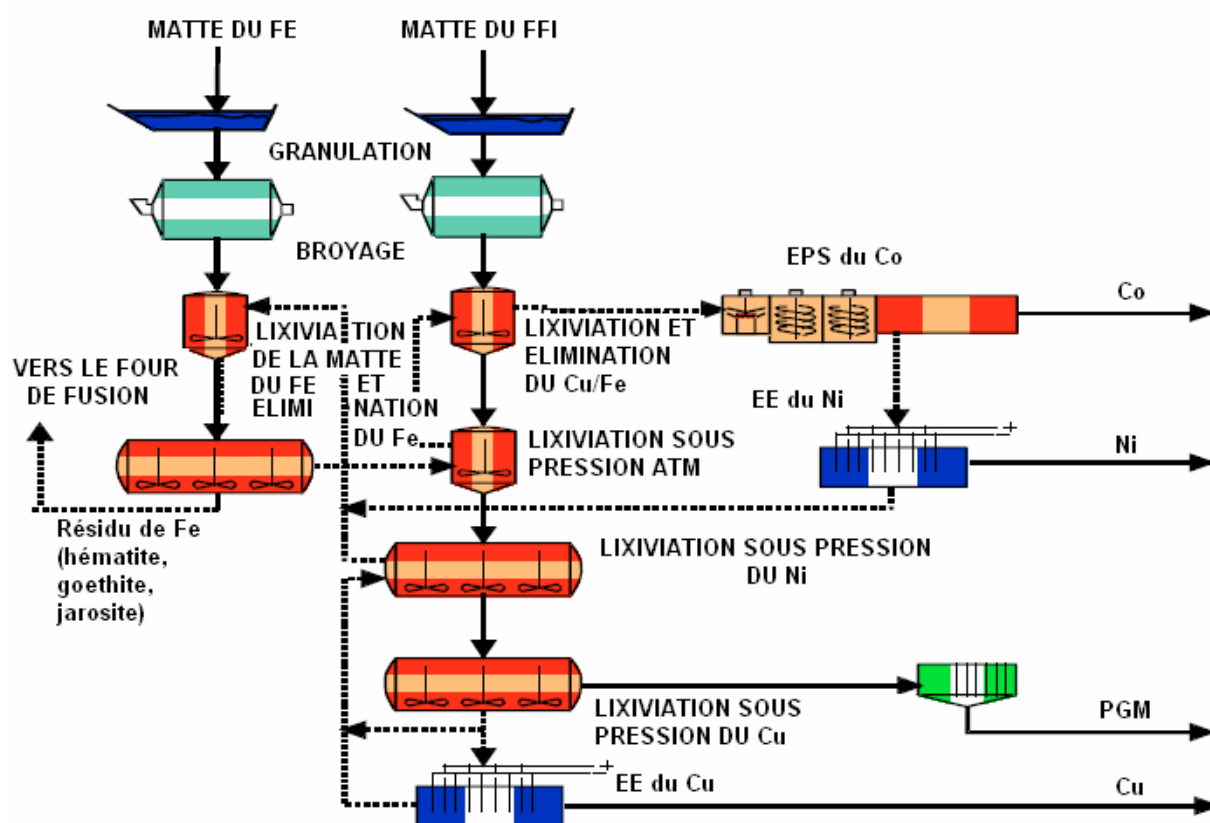
La matte subit une lixiviation dans un anolyte à base de sulfate recyclé à partir de l'extraction électrolytique du nickel [tm 58 & 59, Outokumpu 1997]. La matte de sulfure de nickel subit une lixiviation dans une étape de lixiviation à pression atmosphérique en utilisant des cuves de lixiviation fonctionnant avec de l'oxygène ou de l'air à l'aide d'ions cuivre. Le fer dissout est oxydé pour former de l'oxyde de fer, qui précipite.



Figure 11.7 : Procédé de lixiviation à base de sulfate

Le résidu issu de la lixiviation atmosphérique passe par une étape de lixiviation sous pression où le nickel est dissout et le cuivre précipite sous forme de sulfure de cuivre, qui est renvoyé dans le four de fusion produisant du cuivre. Le précipité d'oxyde de fer est renvoyé dans le four de fusion produisant le nickel. La solution de nickel issue de la lixiviation à pression atmosphérique est purifiée par extraction par solvants pour enlever le cobalt et les impuretés. Le cobalt peut être électro-extrait ou réduit en poudre de cobalt en utilisant de l'hydrogène. Le nickel peut être électro-extrait à partir de la solution de sulfate purifiée pour produire des cathodes.

La poudre de nickel peut être produite en ajoutant de l'ammoniac et du sulfate d'ammonium à la solution. Le mélange est alors réduit dans un autoclave en utilisant une atmosphère d'hydrogène. La poudre est vendue ou peut être frittée sous forme de briquettes. L'acide sulfurique présent est neutralisé avec de l'ammoniac. Le sulfate d'ammonium est récupéré pour être vendu ou réutilisé dans le procédé.



FE = four électrique. FFI = four de fusion instantanée. EPS = extraction par solvants. EE = extraction électrolytique.

Figure 11.8 : Diagramme schématique du procédé d'affinage DON

Ce procédé a été développé sous la forme d'un procédé à deux flux pour permettre de séparer le traitement des mottes produites par le four de fusion et les fours de traitement du laitier dans le procédé montré ci-dessus.

11.1.3.3 Lixiviation sous pression avec de l'ammoniac et réduction par hydrogène

La matte subit une lixiviation dans une solution ammoniacale de sulfate d'ammonium dans des autoclaves sous pression en utilisant de l'air comme oxydant. Après la précipitation du sulfure de cuivre, la solution

de nickel est réduite avec de l'hydrogène dans les autoclaves pour produire de la poudre de nickel métallique. Le sulfate d'ammonium formé dans l'étape de réduction par hydrogène est récupéré par cristallisation. Après la réduction par hydrogène, le reste du nickel dissout et la totalité du cobalt sont précipités avec du sulfure d'hydrogène pour subir un traitement ultérieur [tm 94, Ni Expert Group 1998 ; tm 96, Outokumpu 1998].

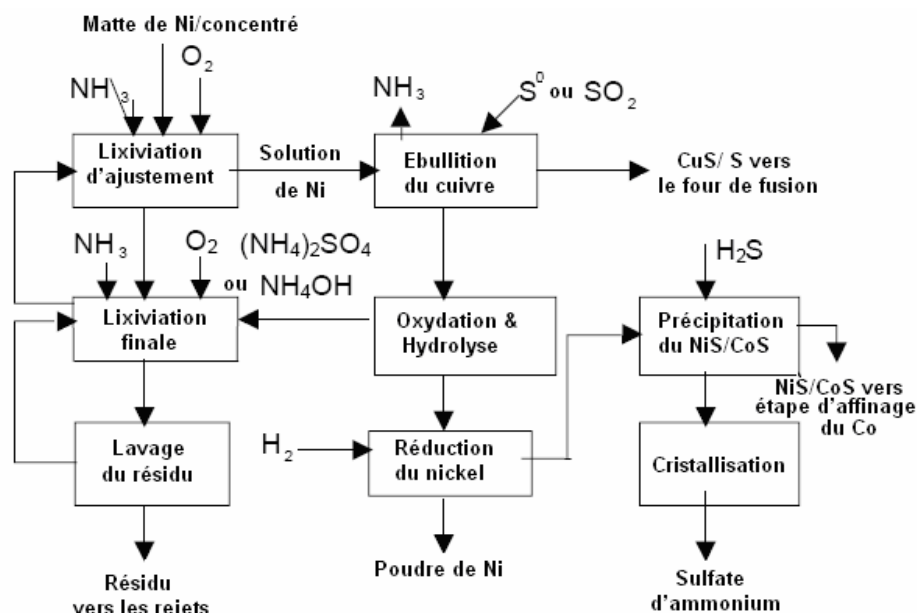


Figure 11.9 : Lixiviation ammoniacale Sherritt [résidus vers rejets → évacuation des résidus]

11.1.3.4 Lixiviation avec du chlorure ferrique

La matte subit une lixiviation en plusieurs étapes en utilisant du chlorure ferrique recyclé en présence de chlore (qui est généré à partir des cellules d'extraction électrolytique) près du point d'ébullition. Le soufre reste à l'état élémentaire et est filtré de la solution finale. Le fer est alors éliminé par extraction par solvants en utilisant du phosphate de tri-butyle, ce qui permet de récupérer le chlorure ferrique. Le cobalt est éliminé dans une étape ultérieure d'extraction par solvants en utilisant de la tri-isooctylamine. La solution de chlorure de cobalt est vendue [tm 94, Ni Expert Group 1998 ; tm 96, Outokumpu 1998].

D'autres impuretés mineures telles que le Cr, l'Al, le Pb, sont éliminées en utilisant une combinaison d'électrolyse, d'échange d'ions et de charbon actif. Le nickel est alors électro-extrait de la solution purifiée dans des cellules à diaphragme en utilisant des anodes de titane et des cathodes de nickel. Le chlore est collecté et renvoyé dans le circuit de lixiviation.

11.1.3.5 Procédé carbonyle

Le procédé carbonyle basse pression utilise un oxyde impur produit par fusion du minerai sulfuré utilisé comme matière première pour raffiner le nickel. Cet oxyde est réduit en un métal impur en utilisant de l'hydrogène et le métal est alors activé. Le carbonyle de nickel est alors formé par la réaction du métal avec du monoxyde de carbone à basse température et basse pression. Le carbonyle de nickel est volatil et est raffiné par séparation à partir des impuretés solides. Le résidu solide est renvoyé pour subir une transformation ultérieure dans le four de fusion primaire pour récupérer les autres métaux qui sont présents [tm 20, HMIP Ni 1993 ; tm 26, PARCOM 1996].

Le gaz de carbonyle de nickel arrive du réacteur et est alors décomposé sous l'action de la chaleur pour former des poudres et des granulés. Il peut également être décomposé sur d'autres substrats tels que des fibres de carbone pour produire des matériaux revêtus de nickel. Pendant la décomposition, le monoxyde de carbone est émis et est récupéré et réutilisé pour produire davantage de carbonyle de nickel. Des sels de nickel pur sont produits par la réaction des granulés de nickel avec des acides. Tout gaz résiduel provenant du procédé est incinéré pour détruire tout carbonyle de nickel et monoxyde de carbone. Les poussières provenant de la post-combustion sont éliminées.

11.1.3.6 Électro-affinage de la matte

La matte de nickel peut être coulée sous forme d'anodes. Celles-ci sont dissoutes dans une cellule électrolytique à diaphragme en utilisant un électrolyte de chlorure/sulfate. L'électrolyte du compartiment de l'anode est purifié et mis en circulation à travers la poche de la cathode. Les anodes sont également placées dans des poches pour collecter la boue d'électrolyse contenant du soufre de l'anode. Le soufre élémentaire et les métaux précieux sont récupérés à partir de la boue. Ce procédé est limité aux mattes qui ont une faible teneur en cuivre. [tm 96, Outokumpu 1998].

11.1.3.7 Extraction par solvants

La plupart des procédés décrits ci-dessus utilisent une étape d'extraction par solvants pour éliminer le fer et pour séparer le nickel et le cobalt avant l'extraction électrolytique ou la transformation. Les complexes d'ions métalliques sont formés en utilisant des agents chélatants de sorte que les ions métalliques souhaités puissent être extraits dans une phase organique. Les ions souhaités sont alors ré-extraits dans une seconde phase aqueuse en modifiant les conditions d'une seconde phase aqueuse.

Le choix du solvant et de l'agent chélatant (complexant) permet d'enlever des ions métalliques spécifiques de la solution aqueuse et de les concentrer. Le mélange solvant/chélatant est recyclé entre les bains d'extraction et de récupération. Les bains comprennent un mélangeur/une cuve de décantation pour permettre au solvant/à l'eau d'entrer en contact puis de subir une séparation de phases. Des systèmes étanches ou couverts sont utilisés pour prévenir l'émission de vapeurs de solvant. La figure suivante montre un schéma générique du procédé.

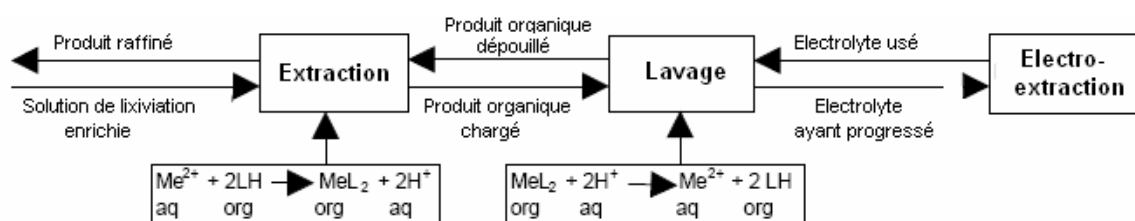


Figure 11.10 : Schéma du procédé d'extraction par solvants (EPS)

11.1.4 Production des alliages de nickel à partir des matériaux de deuxième fusion

Le procédé comprend la préparation des matières premières, la fusion (y compris vidange et coulée), le décapage et l'ébarbage des lingots, le recyclage des déchets et l'« affinage du laitier électrolytique » avec une production d'environ 7 000 t/an.

Les matières premières pour le procédé sont constituées par des déchets recyclés, des déchets achetés et des matériaux vierges. Les déchets sous la forme de tournures, de copeaux, de résidus de coupe etc. sont traités pour enlever l'huile par centrifugation et/ou dégraissage. Les matières premières sont pesées dans

des cuves de chargement pour obtenir la composition souhaitée de l'alliage. Les cuves de chargement sont alors transportées vers le four pertinent.

La fusion à l'air est réalisée dans un four à induction, avec les fumées captées par l'un des deux systèmes d'extraction équipés de filtres à manches. Une certaine quantité du métal fondu à l'air est davantage raffinée dans des fours d'affinage sous vide. Le vide est fourni par des éjecteurs à vapeur et les gaz provenant des éjecteurs sont refroidis en utilisant des condenseurs à pulvérisation.

Trois techniques de coulée sont utilisées : coulée en chute, coulée en source et coulée par basculement. Les fondants de coulée et les produits antiretassure sont utilisés pendant la coulée. Les poches utilisées pour la coulée sont préchauffées par des brûleurs à gaz.

Une fusion sous vide avec chauffage par induction (FVCI) est réalisée dans un four d'une capacité de 7,5 tonnes. La coulée provenant du four est réalisée soit sous vide soit sous atmosphère d'argon.

Un affinage à l'arc sous vide (AAV) est réalisé, qui produit des lingots solides sous vide.

Le laitier est raffiné dans un four électrique.

Les lingots issus de la coulée sont débarrassés de tout matériau réfractaire résiduel etc. Les déchets solides provenant des procédés de coulée, les matériaux réfractaires provenant de la coulée/poche, les laitiers etc. sont collectés en vue de la récupération du métal résiduel. Les lingots décapés peuvent alors être soumis à divers procédés : usinage, sciage, broyage et grenailage. Les déchets issus de ces procédés qui sont générés sous forme de poussières, de copeaux et de tournures, sont collectés en vue d'un nouveau traitement métallurgique ou pour être vendus.

11.1.5 Production du cobalt

Le cobalt est produit pendant la récupération du nickel après séparation par extraction par solvants (EPS) et est décrit ci-dessus. Le cobalt peut être électro-extrait à partir de la solution pour produire des cathodes pouvant être vendues en utilisant des cellules à diaphragme de la même manière que pour le nickel.

Le cobalt peut également être récupéré à partir de la solution sous la forme d'une poudre par réduction par hydrogène. En variante, la solution peut être traitée pour faire précipiter un sous-produit de cobalt impur en vue d'un affinage ultérieur, ou elle peut être vendue.

L'affinage ultérieur de ceux-ci et d'autres sous-produits, intermédiaires et matériaux recyclés contenant du cobalt est réalisé en utilisant une lixiviation à pression atmosphérique avec de l'oxygène dans un milieu d'acide sulfurique ou chlorhydrique. La séparation utilisant des complexes d'hydroxydes, de carbonates et d'amine ou d'ammonium est également utilisée [tm 108, Ullmanns 1996].

Les techniques de précipitation, d'extraction par solvants et d'échange d'ions sont utilisées pour purifier les solutions. Le cobalt est alors récupéré sous forme d'une poudre métallique, d'oxyde métallique ou de sels. Les produits sont élaborés selon une grande variété de caractéristiques physiques et chimiques très spécifiques. Les techniques de pyrolyse des carboxylates, de réduction des oxydes à haute température, de précipitation et de cristallisation sont utilisées en fonction de la taille des particules ou autres caractéristiques qui sont requises [tm 108, Ullmanns 1996].

Ces procédés sont confidentiels sur le plan commercial et sont, de manière inhérente, très spécifiques à un site donné.

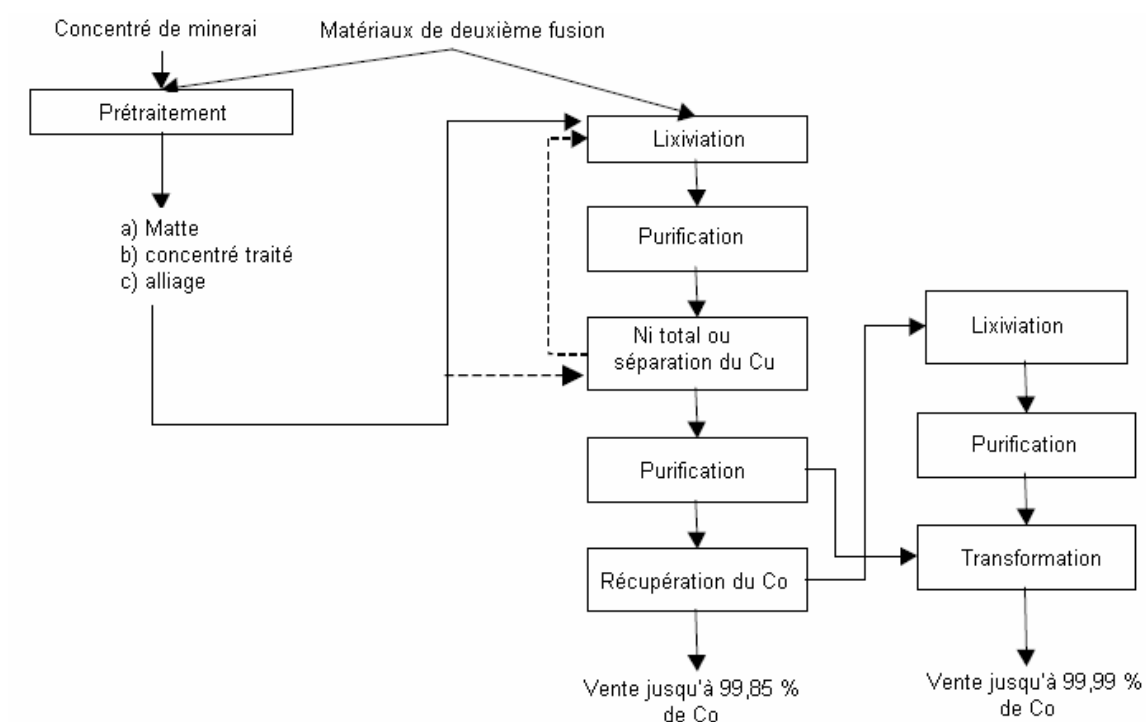


Figure 11.11 : Schéma générique montrant les possibles étapes du procédé pour la production du cobalt

11.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Quelques données relatives aux émissions et aux consommations pour les procédés de traitement des minerais sulfurés mis en œuvre dans le monde sont montrées ci-dessous.

Four de fusion	Unités de process	Capacité t/h	Production annuelle t/a	Enrichissement à l'oxygène %	Teneur en SO ₂ %	Emission de SO ₂
Selebi-Phikve, Botswana	Four de fusion instantanée (FFI) OK à pulvérisation à sec, 3 CPS, traitement électrique du laitier, cr et 2 EP	100	46 000 Matte	24,5		
Nadezhda, Norilsk, Russie	FFI OK à pulvérisation à sec, CPS, four de traitement du laitier, cr, 3 EP, Production de soufre.	170 - 180		45 - 55		
Kalgoorlie, Australie	FFI OK modifié, 3 CPS, cr, EP, usine de fabrication d'acide	110	100 000 Matte	35 - 40		35 000 t/a 350 kg/t
Jinchuan, Chine	FFI OK modifié à sécheur rotatif, BCR, EP, usine de fabrication d'acide	~ 45	21 000 Ni	44 - 46		
Harajvalta, Finlande	FFI OK, sécheur rotatif, procédé DON, cr, EP, usine de fabrication d'acide.	40	30 000 Ni	70 - 92	19	18 kg/t
Fortaleza, Brésil	FFI OK, sécheur à vapeur, procédé DON, refroidissement par trempe, usine de fabrication d'acide	~ 20	19 000 Matte	60 - 70		
Copper Cliff, Ontario, Canada	FFI INCO, sécheur à lit fluidisé, 6 CPS, usine de Cu, usine de fabrication d'acide et usine de production de SO ₂ .	~ 150	127 000 Ni	100	10 - 11	230 000 t/a 1 000 kg/t
Sudbury, Ontario, Canada	Four de grillage à LF, four électrique, 3 CPS, convertisseur de laitier PS, refroidissement par pulvérisation, 3 EP, usine de production d'acide	n.d.	45 000 Ni		6 - 9	50 000 t/a 500 kg/t
Thompson, Canada	Four de grillage à LF, four électrique, 3 CPS	n.d.	81 600 Ni			
Pechenganic kel Russie	Fusion électrique, convertissage, traitement électrique du laitier	n.d.	n.d.			

Note. LF = Lit fluidisé. OK = Outokumpu. CPS = Convertisseur Pierce - Smith. EP = électrofiltre. DON = procédé Direct Outokumpu Nickel. cr = chaudière de récupération. Le terme usine de fabrication d'acide fait référence à une usine de production d'acide sulfurique comprenant la chaîne de refroidissement et de traitement des gaz pertinents. n.d. = non disponible.

Tableau 11.2 : Exemple de données d'entrée et de sortie pour la production de nickel à l'échelle mondiale

11.2.1 Utilisation de l'énergie

L'énergie utilisée pour la production de matte à partir des minerais sulfurés est rapportée comme étant dans la plage 25 à 65 GJ par tonne de nickel pour les minerais contenant de 4 à 15 % de Ni. L'énergie utilisée dans les diverses étapes d'affinage est rapportée comme étant de 17 à 20 GJ par tonne de nickel.

11.2.2 Émissions dans l'air

Les émissions dans l'air provenant de la production du nickel et du cobalt qui posent un problème potentiel sont :

- le dioxyde de soufre (SO₂) et les autres gaz acides,
- les oxydes d'azote (NO_x) et les autres composés azotés,
- les métaux et leurs composés, y compris l'As,
- les poussières,
- le chlore,
- les composés organiques volatils et les odeurs,
- le CO et les carbonyles (niveaux d'alarme fixés à 80 ppb).

La pertinence des substances potentielles émises par les sources majeures est donnée dans le tableau suivant et est discutée plus tard dans cette section:

Composé	Grillage ou fusion	Lixiviation et purification	Électrolyse	Extraction par solvants	Unité de production d'acide sulfurique
Dioxyde et trioxyde de soufre *. HCl	***	•	•	•	***
COV (y compris CO et odeurs)	•	•		**	
Chlore		**	**		
Oxydes d'azote	.*				•
Poussières et métaux	***	•	•		
Note. * Les émissions directes issues des étapes de grillage ou de fusion des minerais sulfurés sont traitées et/ou converties dans les étapes de traitement du gaz et l'unité de production d'acide sulfurique ; les émissions restantes de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote de l'unité de fabrication d'acide sulfurique sont toujours pertinentes. Pour ces sources, les émissions fugitives ou non captées sont également pertinentes. *** Plus important.....* moins important					

Tableau 11.3 : Importance des émissions potentielles dans l'air lors de la production de cobalt et de nickel

Les sources des émissions du procédé sont : -

- le grillage,
- un autre prétraitement,
- la fusion, le convertissage et le traitement du laitier,
- la lixiviation et la purification,
- l'extraction par solvants,

- l'électrolyse,
- l'étape de récupération ou de transformation finale,
- l'unité de production d'acide sulfurique.

11.2.2.1 Dioxyde de soufre et autres gaz acides

Les sources majeures des émissions de dioxyde de soufre sont les émissions fugitives provenant du four de grillage ou du four de fusion. Les émissions non captées issues des étapes de transfert en poche et de soufflage du convertisseur et les émissions directes provenant de l'unité de production d'acide sulfurique sont importantes. Une bonne extraction et un bon scellement des fours empêchent les émissions fugitives et les gaz collectés sont transférés dans une installation de traitement des gaz puis dans l'unité de production d'acide sulfurique. Le captage des gaz issus des étapes de convertissage est une source importante et cet aspect est discuté dans le Chapitre 3 relatif au cuivre et à ses alliages.

Après le traitement, le dioxyde de soufre émis par les étapes de grillage est converti en trioxyde de soufre (SO_3) avec une efficacité comprise entre 95 et 99,8 % en fonction de l'unité de production d'acide sulfurique utilisée (absorption simple ou double) et la concentration du dioxyde de soufre dans le gaz en entrée. Des concentrations en SO_2 de 200 à 1 300 mg/Nm^3 sont émises dans les effluents gazeux. Une très petite quantité de SO_3 n'est pas convertie et est émise conjointement avec le SO_2 . Au cours des phases de démarrage et d'arrêt, il peut se trouver que des gaz faiblement concentrés soient émis sans conversion. Ces événements doivent être identifiés pour les installations individuelles, de nombreuses compagnies ont apporté des améliorations importantes à la régulation du procédé pour prévenir ou réduire ces émissions.

Pendant l'électrolyse, il y a des émissions d'aérosols (acides chlorhydrique et sulfurique dilués et sels de métaux) dans la halle d'électrolyse. Ces émissions quittent la halle d'électrolyse via la ventilation (naturelle) ou à partir des tours de refroidissement et sont classées comme étant des émissions fugitives. Les cellules peuvent être recouvertes de mousses ou de billes en plastique pour réduire la production de brouillards. L'air de ventilation des cellules peut être dévésiculé et la solution renvoyée vers l'étape d'électrolyse.

Le chlore se forme pendant l'électrolyse des solutions de chlorure. Celui-ci est collecté dans le compartiment étanche de l'anode et est renvoyé vers l'étape de lixiviation. Des dispositifs de surveillance du chlore sont utilisés pour détecter les fuites et des laveurs sont utilisés pour enlever les traces de chlore de l'air de ventilation et des autres sources.

Procédé	Produit	Production de métal Tonnes par an	Dioxyde de soufre kg par tonne de métal produit.
Broyage/ Lixiviation	Co et composés	5 000	0,01
Four de fusion pour le Ni	Ni, Co, Cu	200 000	18
Note. Le tableau fait référence à des matières premières spécifiques - Broyage de la matte produite à partir de minerai sulfuré - fusion des concentrés sulfurés de Cu/Ni.			

Tableau 11.4 : Production du dioxyde de soufre à partir de quelques procédés de traitement du nickel et du cobalt

11.2.2.2 Composés organiques volatils

Les composés organiques volatils (COV) peuvent être émis à partir des étapes d'extraction par solvants. Une variété de solvants est utilisée et ces solvants contiennent divers agents complexants pour former des complexes avec le métal souhaité qui sont solubles dans la couche organique. Les émissions peuvent être

empêchées ou minimisées en utilisant des réacteurs couverts ou étanches et dans ce cas, des émissions de l'ordre de 30 mg/Nm³ ont été reportées.

Les solvants peuvent être de nature aliphatique ou aromatique mais habituellement un mélange est utilisé. Les COV peuvent être classés selon leur toxicité mais les composés organiques volatils aromatiques et chlorés sont habituellement considérés comme étant plus nocifs et requièrent une élimination efficace. Des vapeurs de solvants sont émises en fonction de la température de l'étape d'extraction et de la pression de vapeur des composés des solvants à cette température. Des concentrations en COV allant jusqu'à 1 000 mg/Nm³ (~1 kg/h) ont été reportées, mais les conditions de fonctionnement ne sont pas connues [tm 94, Ni Expert Group 1998]. La nature des solvants et les conditions d'utilisation doivent être déterminées localement de sorte que les risques puissent être évalués.

Les COV peuvent être éliminés en utilisant des condenseurs ou en refroidissant l'air de ventilation et en récupérant le solvant en vue d'une utilisation ultérieure. Des émissions massiques de 0,2 kg par tonne de métal produit après condensation ont été reportées [tm 94, Ni Expert Group 1998]. Des filtres à carbone ou des bio-filtres peuvent également être utilisés pour réduire davantage les émissions de COV mais ils ne permettent pas la récupération du solvant.

11.2.2.3 Poussières et métaux

L'entraînement des poussières issues des procédés de grillage, de fusion et de convertissage sont des sources potentielles d'émissions directes et fugitives de poussières et de métaux. Dans certains procédés, les gaz sont collectés et traités dans les procédés de traitement du gaz d'une unité de production d'acide sulfurique. Les poussières sont éliminées et renvoyées vers le procédé de lixiviation.

Procédé	Produit	Production (tonnes)	Poussières kg par tonne de métal	Ni kg par tonne de métal	Co kg par tonne de métal
Broyage/Lixiviation	Co		0,2	0,05	0,03
Broyage de la matte	Ni		0,01	0,005	
Procédé carbonyle	Ni	41 000	0,28	0,007	
Procédé DON et four de fusion pour le cuivre	Ni, Co, Cu	200 000	0,37	0,03	

Tableau 11.5 : Emissions exprimées en masse des métaux pour quelques procédés européens

11.2.2.4 Chlore

Le chlore est utilisé dans certaines étapes de lixiviation et est produit pendant l'électrolyse ultérieure des solutions de chlorure. Les cuves de lixiviation sont étanches et on prévoit un lavage du chlore gazeux pour retirer le chlore non capté.

Les anodes dans les cellules électrolytiques sont contenues dans une membrane et sont enfermées par une hotte de captage. Le chlore émis est collecté et réutilisé dans l'étape de lixiviation. Les systèmes sont étanches et les émissions fugitives ne se produisent que lors d'un dysfonctionnement de la membrane ou des tuyauteries. Les alarmes détectant les fuites de chlore sont très utilisées dans les unités à lixiviation et les halles d'électrolyse pour détecter de tels dysfonctionnements et il n'y a normalement pas d'émissions de chlore.

La présence de chlore dans les eaux usées peut entraîner la formation de composés organiques de chlore si des solvants etc. sont également présents dans un mélange d'eaux usées.

11.2.2.5 Hydrogène, monoxyde de carbone et carbonyles

Le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont utilisés dans l'affinage vapo-métallurgique du nickel pour produire du nickel brut puis du carbonyle de nickel. Ces gaz sont explosifs ou très toxiques et donc des dispositifs de mise en étanchéité des réacteurs et des équipements de régulation sophistiqués sont utilisés pour empêcher les émissions, et des systèmes complets de surveillance et d'alarme sont utilisés. L'hydrogène est également employé comme agent réducteur dans les procédés de récupération ou de transformation hydrométallurgique ou pyrométallurgique. Une conception de procédé robuste comprenant des équipements correctement dimensionnés et des systèmes d'évacuation des gaz appropriés sont utilisés pour éviter les mélanges de gaz explosifs.

Le monoxyde de carbone est récupéré et les gaz résiduels issus du procédé sont enfin incinérés pour détruire tout monoxyde de carbone ou carbonyle qui peut être présent, le carbonyle de nickel est converti en oxyde de nickel, qui est récupéré.

11.2.2.6 Oxydes d'azote

Les étapes de grillage et de fusion sont des sources potentielles d'oxydes d'azote (NO_x). Les NO_x peuvent se former à partir des composés azotés qui sont présents dans les concentrés ou sous forme de NO_x thermiques. L'acide sulfurique produit peut absorber une grande partie des NO_x et ceci peut donc affecter la qualité de l'acide sulfurique. Si des niveaux élevés de NO_x sont présents après les étapes de grillage, le traitement des gaz de grillage peut être nécessaire pour des raisons de qualité du produit et pour des raisons environnementales. La fusion directe utilise un enrichissement à l'oxygène mis à part pour la vaporisation du laitier et elle peut réduire les émissions de NO_x thermiques. D'autres fours qui utilisent des brûleurs d'oxycombustion montrent également une réduction des NO_x mais l'inverse peut être vrai aux niveaux inférieurs d'enrichissement à l'oxygène quand l'augmentation de la température et la teneur en azote sont importantes. La plage pour tous les procédés est de 20 à 400 mg/Nm³.

11.2.2.7 Émissions fugitives

A côté des émissions issues du procédé, des émissions fugitives se produisent. Les sources d'émissions fugitives principales sont :

- les poussières provenant du stockage et de la manutention des concentrés,
- les fuites provenant des fours de grillage, des fours de fusion et des convertisseurs,
- les poussières provenant des gaz émis par les cuves de lixiviation et de purification,
- les effluents gazeux (y compris l' HCl , le Cl_2 et les COV) provenant des unités d'extraction par solvants et d'extraction électrolytique,
- les poussières provenant des effluents gazeux des fours de coulée,
- divers, y compris l'air de ventilation des bâtiments.

Bien que les émissions fugitives soient difficiles à mesurer et à estimer, il existe quelques méthodes qui ont été utilisées avec succès (Section 2.7). Le tableau suivant donne quelques estimations pour un four de fusion primaire où les gaz de ventilation provenant du four de fusion et du convertisseur sont collectés et traités avec les gaz du sécheur.

Émissions	[t/a] provenant de
-----------	--------------------

	Capture primaire	Capture secondaire	Emissions fugitives
Dioxyde de soufre	523	2 242	147

Tableau 11.6 : Importance du captage des fumées secondaires et des émissions fugitives

[tm 142, Finland Ni 1999]

Le tableau ci-dessus montre que les émissions fugitives peuvent être importantes dans la fusion primaire si les gaz de ventilation ne sont ni collectés ni traités. Dans ce cas elles seraient largement supérieures aux émissions dépolluées. Les données collectées indiquent que les procédés d'affinage ont des émissions fugitives inférieures et que le procédé carbonyle est particulièrement bien étanche. Des actions pour réduire les émissions fugitives peuvent être nécessaires dans certains procédés.

11.2.3 Émissions dans l'eau

Les métaux et leurs composés et les matières en suspension sont les principaux polluants émis dans l'eau. Les métaux concernés sont le Cu, le Ni, le Co, l'As et le Cr. Les autres substances importantes sont les fluorures, les chlorures et les sulfates.

Les possibles écoulements d'eaux usées sont :

- les procédés de purification hydrométallurgique,
- les eaux usées provenant des laveurs humides,
- les eaux usées provenant des électrofiltres humides,
- les eaux usées issues de la granulation du laitier,
- l'effluent liquide de lavage de l'anode et de la cathode,
- l'eau d'arrêt provenant des pompes,
- les opérations générales, y compris le nettoyage de l'équipement, du sol, etc.,
- les rejets depuis les circuits de l'eau de refroidissement,
- le ruissellement de l'eau de pluie provenant des zones en surface (en particulier des zones de stockage) et des toits.

Les eaux usées issues du traitement du gaz par voie humide (s'il est utilisé) dans les étapes de grillage du four de fusion, du convertisseur et du lit fluidisé sont les sources les plus importantes. Les autres sources sont le nettoyage et les sources diverses. Les étapes de lixiviation fonctionnent habituellement en circuit fermé et les systèmes de drainage sont isolés mais il y a des problèmes potentiels sauf si de bons systèmes de détection et de prévention des fuites et sont utilisés, des solutions de purge d'électrolyte sont utilisées dans l'étape de lixiviation.

11.2.3.1 Eaux usées provenant de l'unité de dépollution

Si des laveurs humides sont utilisés après les procédés de lixiviation et de grillage, une solution acide est produite. Le laveur élimine les fluorures, le chlore, les chlorures, la majeure partie du mercure et du sélénium et certaines particules qui passent à travers le traitement mécanique des gaz. Pour éviter l'accumulation de contaminants, un certain volume de liquide doit être purgé en continu depuis le laveur puis être traité. Le SO₂ dissout est éliminé avant rejet.

Les filtres électrostatiques humides produiront également un liquide de lavage acide. Celui-ci est recyclé après filtration. Un certain volume de liquide doit être purgé à partir de ce circuit pour éliminer l'accumulation de contaminants. Cette solution de purge est traitée et analysée avant rejet.

Le tableau ci-après donne une indication de la composition des liquides issus de l'épuration des gaz avant leur traitement.

Polluant	Concentration (dissout)	Composition des solides en suspension
Solides		250 – 1 500 mg/l
Sulfate	13 - 25 g/l	
Chlorure	1,3 - 1,8 g/l	
Fluorure	0,3 - 0,5 g/l	
Cobalt	0,1 - 9 mg/l	5 - 30 % de solides en suspension
Nickel	0,1 - 10 mg/l	10 - 60 % de solides en suspension
Cuivre	5 - 15 mg/l	< 0,05 % de solides en suspension
Zinc	0,1 - 2,5 g/l	2 - 6 % de solides en suspension
Cadmium	1 - 5 mg/l	
Plomb	1 - 3 mg/l	5 - 50 % de solides en suspension

Tableau 11.7 : Effluents typiques issus de l'épuration des gaz

11.2.3.2 Sources diverses

Les électrodes et les membranes utilisées pendant l'électrolyse doivent être rincées périodiquement pour enlever la matière déposée en surface. Du dioxyde de manganèse peut se former à la surface des anodes par réaction de l'oxygène avec le manganèse dissout. Après rinçage des anodes, le manganèse est séparé de l'eau de rinçage en vue d'une réutilisation externe. Les cathodes sont nettoyées après élimination des feuilles de Co ou de Ni. Les effluents liquides de lavage de l'anode et de la cathode sont acides et sont susceptibles de contenir du cuivre, du nickel, du cobalt et des solides en suspension.

L'eau de refroidissement issue de la granulation de la matte ou du laitier est habituellement remise en circulation dans un système en circuit fermé. Ont été signalés des cas de formation de composés organiques de chlore persistants et de dioxines dans certains circuits de refroidissement des procédés de lixiviation du chlore.

Les filtres et les eaux usées issus des procédés de séparation et de transformation hydrométallurgiques sont traités en vue de l'élimination des métaux et des solides en suspension. Les produits de ce traitement peuvent être renvoyés vers des opérations en amont, en fonction de leur composition et de leur valeur.

Unité de process	Opération/source	Options de traitement/utilisation
Générale	Eau de pluie provenant des routes, des parcs de stockage, des toits Nettoyage à l'eau des routes Nettoyage des camions, ...	Installation de traitement/réutilisation des eaux usées Installation de traitement des eaux usées Recyclage, installation de traitement des eaux usées
Opération de fusion	Eau de refroidissement provenant du four, des machines et de l'équipement	Recyclage
Granulation de la matte ou du laitier	Effluent issu du électrofiltre humide (si nécessaire) Eau de granulation	Recyclage, installation de traitement des eaux usées Recyclage
Système d'épuration des gaz	Condensat issu du refroidissement des gaz, du électrofiltre humide Condensat issu de l'élimination du mercure Fuites	Élimination des poussières en suspension et réutilisation comme charge, installation de traitement des eaux usées Après élimination du mercure vers l'installation de traitement des eaux usées Recyclage
Unité de production d'acide sulfurique	Équipement d'eau de refroidissement Fuites	Recyclage Installation de traitement des eaux usées
Stockage de la charge	Eau de surface (pluie/humidification)	Installation de traitement des eaux usées
Installation de frittage	Laveur (refroidissement des fines de frittage)	Installation de traitement des eaux usées
Traitement du gaz de grillage	Traitement du gaz par voie humide	Installation de traitement des eaux usées
Grillage/traitement du gaz de grillage	Traitement par voie humide des gaz de grillage	Installation de traitement des eaux usées
Lixiviation	Opérations générales comprenant le traitement des gaz par voie humide	Récupération des métaux
Purification	Opérations générales Gâteaux de filtration	Récupération des métaux Lavage à contre-courant
Électrolyse	Traitement des cellules, anodes et cathodes	Récupération des métaux
Toutes les unités de processs	Maintenance	Installation de traitement des eaux usées
Installation de traitement des eaux usées	Traitement de l'effluent	Réutilisation pour certaines applications/rejets

Tableau 11.8 : Tableau résumant les sources potentielles des eaux usées et les options

Procédé	Effluent [m³/t]	Flux de production [m³/h]	Composés principaux [mg/l]					DCO
			Cu	Zn	As	Co	Ni	
Co		200	< 0,1	< 1,5	< 0,1	< 1,5	< 1,0	25
Lixiviation du Cl		55	0,1			0,2	0,7	
Lixiviation du Cl			1,0	1,0		0,25	1,0	
Carbonyl		450	0,4			0,1	1,4	
Four de fusion + Lixiviation	135		17 g/t	9 g/t	2 g/t		16,5 g/t	

Tableau 11.9 : Exemples d'analyses des eaux usées

11.2.4 Résidus et déchets issus du procédé

La production de métaux est liée à la génération de plusieurs sous-produits, résidus et déchets, qui sont également listés dans le catalogue européen des déchets (Décision du conseil 94/3/EEC). Les résidus spécifiques au procédé les plus importants sont listés ci-dessous.

Les résidus apparaissent comme résultat du traitement des effluents liquides. Le résidu principal est le gypse résiduel (CaSO_4) et les hydroxydes de métaux qui sont produits au niveau de l'installation de neutralisation des eaux usées. Ces déchets sont considérés comme étant un effet croisé de ces techniques de traitement mais nombre d'entre eux sont recyclés vers le procédé métallurgique pour récupérer les métaux, en fonction de leur valeur.

Les poussières ou la boue issues du traitement des gaz sont utilisées comme matières premières pour la production d'autres métaux tels que les métaux précieux et le Cu etc. ou elles peuvent être renvoyées dans le four de fusion ou dans le circuit de lixiviation en vue d'une récupération.

11.2.4.1 Précipités issus des procédés de purification

La production de solides à base de fer représente un volume important des déchets en fonction du procédé utilisé. La composition est montrée dans le tableau suivant.

Procédé	Fe %	Zn %	Co %	Cu %	Ni %
Résidus d'hydroxyde de fer dans le procédé de lixiviation avec du chlorure	40		0,1	< 0,1	1 - 2
Résidus de gypse		25	2 - 3		
Traitement des eaux usées	< 10	< 10	< 0,5	< 1	< 0,05

Tableau 11.10 : Exemple-compositions des différents types de résidus

La mise en décharge de ces résidus peut représenter un coût considérable puisque des bassins revêtus, de construction spéciale sont utilisés pour contenir ce matériau. Il faut porter une attention spéciale aux fuites et ces bassins nécessitent absolument une surveillance des eaux souterraines. Il y a un effet croisé important. Il existe un site qui dépose les déchets dans des cavités rocheuses souterraines.

11.2.4.2 Laitiers et résidus pyrométallurgiques

Les laitiers issus des procédés de fusion contiennent habituellement des concentrations très faibles de métaux lixiviables après traitement du laitier. Ils sont donc adéquats pour une utilisation dans la construction. La production de laitier est entre 4 et 10 fois le poids du métal produit en fonction de la source du concentré.

Le tableau ci-après donne des exemples de la composition de certains laitiers de nickel. La composition exacte sera également dépendante de la source du concentré.

Composé	Four à réverbère	Four électrique	Four de fusion instantanée Outokumpu*
Nickel %	0,2	0,17	0,1 - 0,3
Cobalt %	0,1	0,06	0,1 - 0,25
Cuivre %	0,08	0,01	0,05 - 0,25
Fer %	38		35 - 43
Silice %	36	35	30 - 39
Chaux %	2		0,5 - 7
Note. *Après traitement dans le four électrique			

Tableau 11.11 : Composition des laitiers de nickel typiques

Un certain nombre de tests de lixivibilité standard sont utilisés par les États membres et ceux-ci sont spécifiques au pays en question. Les laitiers de nickel sont listés dans l'Union européenne sur la liste annexe du règlement portant sur les mouvements transfrontières de déchets.

Les crasses et les solides, retirés pendant les étapes de fusion et d'affinage, contiennent des métaux qui sont adéquats pour la récupération. Le tableau suivant montre certaines des options de traitement ou de réutilisation.

Étape du procédé	Production de solides	Options d'utilisation/traitement
Autoclave	Résidu	Four de fusion
Élimination du fer	Précipité	Four de fusion ou mise en décharge
Dépollution	Poussières sous filtre	Four de fusion
Lixiviation sous pression	Résidu de sulfure	Récupération du Cu
Élimination du cuivre	Ciment de Cu	Four de fusion pour le Cu
Régénération du nickel et du cobalt	Carbonate de nickel impur	Production de sulfate de nickel pur
Traitement du laitier	Laitier propre	Construction
Élimination de l'As etc.	Ferri-arséniate de gypse	Mise en décharge spéciale ou récupération de l'As
Traitement des effluents	Précipité	Récupération des autres métaux ou mise en décharge

Tableau 11.12 : Résidus solides issus des procédés de production de Ni et Co

11.2.4.3 Autres matériaux

Les autres résidus ou boues provenant des différentes étapes de procédés ou du traitement général des eaux usées, en fonction de leur composition et de leur valeur, peuvent être recyclés ou mis en décharge ultime.

11.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les États membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques générales décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans le secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et les procédés annexes.

Les techniques générales décrites dans le Chapitre 2 « Procédés communs » s'appliquent dans une large mesure aux procédés de ce secteur et influencent la manière dont les procédés principaux et associés sont régulés et exploités. Des techniques utilisées par les autres secteurs sont également applicables, en particulier celles liées à l'utilisation de systèmes de récupération du soufre.

Les techniques à prendre en compte pour un site donné sont fortement influencées par les matières premières qui sont disponibles sur le site, en particulier le type et la variabilité du concentré, du produit intermédiaire (par exemple matte) ou des matières premières secondaires. Les autres métaux qu'ils contiennent peuvent également être cruciaux pour le choix du procédé. D'une manière similaire le standard des systèmes de collecte et de dépollution utilisés à l'échelle mondiale dans l'industrie reflète les standards de qualité environnementale locaux, régionaux ou transfrontalière et la comparaison directe de la performance environnementale des combinaisons de procédés est donc difficile. Il est possible, cependant, de juger de la manière dont un procédé particulier peut fonctionner avec l'équipement de dépollution moderne approprié.

Les procédés décrits ci-dessus s'appliquent à une grande gamme de matières premières de quantité et de composition variables et sont également représentatifs de ceux utilisés dans le monde. Les techniques ont été développées par les compagnies de ce secteur pour tenir compte de cette variation. Le choix d'une technique pyro-métallurgique ou hydrométallurgique est dicté par les matières premières utilisées, leur quantité, les impuretés présentes, le produit fabriqué et le coût de l'opération de recyclage et de purification. Ces facteurs sont donc spécifiques à un site donné. Les procédés de récupération de base exposés dans la section relative aux techniques appliquées constituent donc les techniques à prendre en compte pour les procédés de récupération quand elles sont utilisées avec des étapes de dépollution appropriées. Les techniques à prendre en compte pour les étapes de collecte et de dépollution et autres aspects du fonctionnement et de la régulation du procédé sont traités dans les sections 2.6, 2.7 et 2.8.

11.3.1 Procédés de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux

Les matières premières sont des concentrés, du chlore et autres gaz, des produits intermédiaires, des fondants et des combustibles, les autres matériaux importants sont les produits, l'acide sulfurique, les laitiers et les résidus du procédé. Les aspects importants sont la prévention des fuites de poussières et de matériau humide, la collecte et le traitement des poussières et des liquides et la régulation des paramètres d'entrée et de fonctionnement des procédés de manutention et d'alimentation.

Les questions spécifiques à ce groupe sont : -

- La nature potentiellement pulvérulente des concentrés et des fondants implique que les systèmes de stockage, de manutention et de traitement fermés sont les techniques à prendre en compte dans ces cas ;

- La formation de poussières générées par certaines opérations de concassage implique que la collecte et la dépollution peuvent être applicables à ce procédé ;
- Les concentrés sont mélangés avec des fondants pour produire une charge assez constante ; la façon de procéder consiste donc généralement à échantillonner et à analyser pour caractériser les concentrés et stocker les concentrés individuels séparément de sorte qu'un mélange optimal puisse être préparé pour la fusion. Il s'agit d'une technique à prendre en compte ;
- Des produits intermédiaires tels qu'une matte peuvent également nécessiter d'être manipulés de cette manière en fonction du potentiel de formation des poussières ;
- Le chlore et les autres gaz seront manipulés conformément aux conditions de sécurité spécifiques pour éviter les fuites et contenir les gaz.

Les gaz associés au procédé tels que le chlore, l'hydrogène ou le monoxyde de carbone peuvent être stockés dans des cuves sous pression approuvées ou ils peuvent être produits sur site. La production de ces gaz est traitée ailleurs. Les gaz sont habituellement régénérés et recyclés pendant les procédés et sont renvoyés vers le procédé ou bien ils sont stockés.

L'acide produit pendant le procédé doit être stocké dans des réservoirs à double paroi ou des réservoirs placés dans des enceintes de protection résistantes aux produits chimiques. Le traitement des boues acides provenant de l'unité de production d'acide sulfurique et de l'acide faible provenant des systèmes de lavage dépend des conditions locales de traitement ou de mise en décharge sauf s'il y a une utilisation locale du matériau.

Les boues et autres résidus métalliques qui sont destinés à la récupération hors site doivent être stockés dans des fûts ou en utilisant d'autres moyens adéquats en fonction du matériau.

Il existe une variété de matières premières secondaires utilisées et elles varient depuis les poussières fines jusqu'aux grands objets isolés. La teneur en métal varie pour chaque type de matériau, ainsi que la teneur des autres métaux et contaminants. Les techniques utilisées pour le stockage, la manutention et le prétraitement varieront donc selon la taille du matériau et l'amplitude de toute contamination éventuelle. Ces facteurs varient d'un site à l'autre et les techniques discutées dans le Chapitre 2 seront appliquées spécifiquement en fonction de chaque site et chaque matériau. Les questions spécifiques qui s'appliquent à ce groupe sont montrées dans le Tableau 11.15 de la section relative aux MTD.

Le stockage des matières premières dépend de la nature du matériau décrit ci-dessus. Le stockage des poussières fines dans les bâtiments fermés ou dans un emballage étanche est utilisé. Les matériaux qui contiennent des composés solubles dans l'eau sont stockés à l'abri. Le stockage des matériaux non pulvérulents en tas à ciel ouvert et des grands objets individuels à ciel ouvert est utilisé.

11.3.2 Procédés de fusion primaire

Le seul procédé de fusion utilisé pour la production directe du nickel ou du cobalt en Europe est le four de fusion instantanée Outokumpu qui utilise l'enrichissement à l'oxygène. Celle-ci est utilisée pour produire une matte de nickel et un laitier qui est traité ultérieurement dans un four électrique pour produire davantage de matte et un laitier inerte. Les mattes sont granulées en vue du traitement hydrométallurgique et le laitier est granulé ou refroidi et utilisé dans le génie civil. L'utilisation du four de fusion instantanée Outokumpu de cette manière est caractérisée par une faible consommation d'énergie du procédé global (7 mWh par tonne de Ni) et le fonctionnement fiable du four. Le procédé est caractérisé par une récupération de la chaleur sous la forme de vapeur d'eau et d'électricité et également par le captage et la récupération du dioxyde de soufre sous forme d'acide sulfurique. Les informations collectées indiquent que la durée de vie du garnissage du four est supérieure à 5 ans. Les autres procédés utilisés sur la planète sont également les techniques à prendre en compte.

Le convertisseur Pierce-Smith n'est pas utilisé pour la production du nickel ou du cobalt en Europe. L'utilisation de ce convertisseur serait une technique à prendre en compte quand il est utilisé de manière combinée avec un système de captage des fumées secondaire intelligent et un système de régulation du soufflage du four (voir le Chapitre 3 relatif au cuivre).

Le cobalt est généralement récupéré de manière combinée avec le nickel. Le procédé qui est utilisé pour produire du ferro-nickel est traité dans le Chapitre 9, relatif aux ferroalliages.

Le système de dépollution utilisé pour la fusion primaire des concentrés sulfurés est la récupération du dioxyde de soufre, habituellement par conversion en acide sulfurique dans une unité de contact à double absorption avec quatre étages ou plus, parfois un catalyseur dopé au césium est utilisé. La conversion d'une partie du SO_2 en SO_2 liquide est également mise en œuvre, le reste étant converti en acide sulfurique. Les gaz sont refroidis (avec récupération de la chaleur/de l'énergie) et traités avant la conversion. Une combinaison de refroidisseurs et de filtres électrostatiques haute température ou une combinaison de laveurs (radiaux ou à jet) et de filtres électrostatiques humides sont utilisés. Des systèmes de récupération du mercure sont employés si nécessaire en utilisant les techniques discutées dans la Section 2.8.

11.3.3 Procédés d'affinage et de transformation

11.3.3.1 Lixiviation, affinage chimique et extraction par solvants

Les procédés d'affinage décrits dans les techniques appliquées s'appliquent à une grande gamme de matières premières de quantité et de composition variables. Les techniques ont été développées par les compagnies de ce secteur pour tenir compte de cette variation. Le choix d'une technique pyrométallurgique ou hydrométallurgique est dicté par les matières premières utilisées, les impuretés présentes et le produit fabriqué. En particulier, la morphologie du produit final peut être cruciale, par exemple quand des poudres sont produites pour la fabrication de piles ou quand des revêtements métalliques sont appliqués à une variété de substrats tels que des mousses.

Les procédés d'affinage de base exposés ci-dessus constituent donc les techniques à prendre en compte pour les procédés de récupération. L'application des techniques d'étanchéité, de dépollution, de régulation et de gestion du réacteur qui sont traitées dans le Chapitre 2 de ce document sont les techniques à prendre en compte.

EXEMPLE 11.01 MINIMISATION DES EMISSIONS DE COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS

Description : - Utilisation d'un mélangeur à faible cisaillement pour le mélange solvant/eau pour optimiser la taille des gouttelettes et minimiser le contact avec l'air. Un mélangeur couvert et une zone de décantation couverte distincte, réduisent les émissions de COV dans l'air et l'entraînement dans la phase aqueuse. L'utilisation d'un système de pompage à faible cisaillement et à vitesse variable réduit la consommation d'énergie du système.

Principaux bénéfices environnementaux : - Prévention des émissions de COV

Données opérationnelles : - Concentration de COV dans l'air en ambiance professionnelle < 5 ppm (< 30 mg/Nm³) quand le kérosène était utilisé comme solvant.

Effets croisés : - Effet positif de la prévention des émissions de COV, réduction de la consommation d'énergie.

Aspects économiques : - Non disponibles mais le procédé fonctionne de façon viable dans plusieurs installations.

Applicabilité : - Tous les procédés d'extraction par solvants.

Exploitations de référence : - Finlande

Documents de référence : - [tm 94, Nickel Expert Group 1998]

11.3.3.2 Extraction électrolytique

L'extraction électrolytique peut produire des gaz qui sont émis au niveau de l'anode et produira du chlore ou un brouillard acide. Ceux-ci doivent être collectés et éliminés, l'extraction et l'élimination du brouillard sont utilisées et le brouillard collecté est renvoyé vers le procédé, le lavage des gaz collectés ne permet pas la réutilisation du brouillard et contribue aux eaux usées. La couverture des cellules peut être utilisée pour réduire la quantité de brouillard formé, mais elle n'est pas aussi efficace que le dévésiculation ; des revêtements organiques ou des couches de billes en plastique peuvent être utilisés. Dans le cas des procédés d'extraction électrolytique basés sur le chlorure, la récupération et la réutilisation du chlore produit à partir des cellules est considérée comme faisant partie du procédé.

EXEMPLE 11.02 COLLECTE ET REDUCTION DU CHLORE GAZEUX.

Description : - Collecte des gaz produits lors des procédés d'extraction électrolytique et de lixiviation. Les cellules électrolytiques sont équipées d'une hotte intégrée, qui collecte le chlore. Les réacteurs de lixiviation sont étanches. Le gaz issu de l'extraction électrolytique est collecté et extrait vers un système central et est renvoyé vers l'étape de lixiviation.

Principaux bénéfices environnementaux : - Réduit la nécessité d'un système complexe de lavage des gaz.

Données opérationnelles : - Non disponibles.

Effets croisés : - Effet positif par prévention des émissions de chlore. La réutilisation du chlore permet de minimiser la quantité de chlore achetée. La réduction de la quantité de lavage des gaz évite les rejets d'effluent.

Aspects économiques : - Non disponibles. Le système est viable dans la plupart des procédés d'extraction électrolytique utilisant des solutions de chlorure.

Applicabilité : - Toute unité d'extraction électrolytique.

Exploitations de référence : - Norvège, France

Documents de référence : - [tm 94, Nickel Expert Group 1998]

Les procédés et les techniques utilisées pour la régulation, la collecte des brouillards et la récupération et l'élimination des gaz acides sont adaptés aux installations nouvelles et existantes.

Les systèmes de drainage des halles électrolytiques étanches et la récupération de la purge d'électrolyte, sont également des techniques à prendre en compte.

11.3.3.3 Autres métaux

Les métaux précieux et le cuivre sont souvent associés aux matières premières et soit ils sont récupérés sur site, soit les résidus sont envoyés vers d'autres raffineries. Les procédés dont on a discuté précédemment comme étant des techniques disponibles sont tous considérés comme des techniques à prendre en compte.

lors de la détermination des MTD. Les matières chargées spécifiques influenceront le choix du procédé final. Il faut également considérer les techniques discutées dans le Chapitre 2 en liaison avec ces procédés.

11.3.3.4 Production de lingots de poudres de métal et autre produits

Les procédés dont on a discuté précédemment comme étant des techniques disponibles sont tous considérés comme des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

Les matières chargées spécifiques et les produits finaux influenceront le choix du procédé et les facteurs de taille et de forme du produit sont les facteurs ayant la plus grande influence. Il faut également prendre en compte les techniques discutées dans le Chapitre 2 en liaison avec ces procédés.

11.3.4 Collecte et dépollution des fumées/gaz

Les techniques discutées dans la Section 2.7 de ce document sont les techniques à prendre en compte pour les diverses étapes de procédé impliquées dans la production du cobalt et du nickel etc. L'utilisation de hottes de confinement ou de hottes secondaires est également une technique à prendre en compte. Il y a plusieurs questions spécifiques à chaque site qui s'appliquent aux techniques de dépollution utilisées. Elles dépendent des réactifs utilisés dans le procédé et des composés présents dans les effluents gazeux. Certaines des techniques sont résumées dans le tableau suivant.

Réactif utilisé.	Composé dans les effluents gazeux	Méthode de traitement.
Solvants, COV	COV, odeurs	Confinement, condensation. Charbon actif, Bio-filtre
Chlore, HCl	Cl ₂	Collecte et réutilisation. Système de laveur basique
Sulfures	Dioxyde de soufre	Unité de production d'acide sulfurique ou laveur.
Acide nitrique	NO _x	Oxydation et absorption, recyclage, système de laveur.
Ammoniac	NH ₃	Récupération, système de laveur.
Hydrogène	H ₂	Régulation du procédé, post-combustion.
Monoxyde de carbone	CO	Récupération et réutilisation. post-combustion et élimination des poussières.

Tableau 11.13 : Méthodes de traitement chimique pour quelques composés gazeux

Par essence, les technologies de procédés discutées dans ce chapitre, combinées à une dépollution adéquate, répondront aux conditions strictes de protection de l'environnement. Un exemple de collecte du chlore gazeux émis au niveau de l'anode pendant l'extraction électrolytique et la lixiviation est donné. Les autres techniques comprennent le confinement des vapeurs de solvants en utilisant des réacteurs d'extraction par solvants fermés et la collecte et la réutilisation des solvants et du CO. L'importance des COV individuels dépend du solvant utilisé et ceux-ci ne peuvent être identifiés que localement.

L'utilisation de hottes pour la vidange et la coulée et l'utilisation d'un captage secondaire des fumées issues des étapes de fusion et de convertissage sont également des techniques à prendre en compte. Les fumées émises lors de la vidange seront constituées par les fumées issues de l'utilisation de la lance à oxygène, les poussières issues du perçage, les fumées provenant des cônes de broyage vaporisés si un

pistolet à piquée est utilisé et les fumées provenant de toutes les surfaces de métal et de laitier exposées. Ces fumées seront principalement constituées par les oxydes des métaux qui sont impliqués dans le procédé de fusion. La conception du système de hottes d'extraction de fumées doit tenir compte de l'accès pour le chargement et des autres opérations du four et de la manière dont la source des gaz du procédé change au cours du cycle du procédé.

11.3.5 Régulation et gestion du procédé

Les principes de régulation et de gestion du procédé discutés dans le Chapitre 2 sont applicables aux procédés de production utilisés dans ce groupe. Certains des procédés sont susceptibles d'être améliorés grâce à l'adoption de bon nombre de ces techniques.

11.3.6 Eaux usées

Il s'agit d'une question spécifique à chaque site. D'après les informations collectées, les systèmes de traitement existants sont très performants. Toutes les eaux usées doivent être traitées pour enlever les métaux dissous et les solides. Les techniques listées dans la Section 2.9 sont les techniques à prendre en compte. Dans un certain nombre d'installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées, y compris l'eau de pluie, sont réutilisées ou recyclées dans les procédés. De façon similaire, l'eau de granulation peut nécessiter une décantation ou un autre traitement avant rejet dans l'eau.

11.3.7 Résidus du procédé

Il s'agit d'une question spécifique à chaque site et à chaque procédé mais la minimisation et la réutilisation des résidus doivent être prises en compte, où cela est possible d'un point de vue pratique. Les techniques à prendre en compte dans la Section 2.10 sont les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD.

11.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêter une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production nickel et du cobalt : les COV, les poussières, les fumées, les odeurs, le SO₂, le chlore, le CO et les autres gaz acides, les eaux usées, les résidus tels que la boue, les poussières sous filtre et le laitier ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens large de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement d'expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de

l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux États membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des matières premières disponibles au niveau du site concerné. Les principaux facteurs sont leur composition chimique, la présence éventuelle d'autres métaux, leur granulométrie (y compris le risque de formation de poussières) et leur degré de contamination par d'autres matériaux. Il peut y avoir une ou plusieurs source(s) de matières premières primaires, des matières premières secondaires de qualité variable ou un produit intermédiaire qui requiert un affinage ou une transformation.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de réduction des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; ainsi, certains procédés sont plus faciles à conduire de façon hermétique. D'autres procédés peuvent être en mesure de traiter plus facilement les matériaux recyclés et permettent donc de minimiser l'impact environnemental en empêchant leur rejet.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique du procédé et du système de traitement de effluents est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les conditions variables signifient que les MTD sont principalement influencées par les matières premières disponibles sur le site, les propriétés physiques et chimiques des produits devant être fabriqués et le volume de production demandé à l'usine. Les questions sont donc spécifiques à un site donné.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières alimentées qui peuvent être traitées ?

- La nature de l'alimentation et des autres métaux qu'elle contient a une incidence sur le choix du procédé.
- Existe-t-il des restrictions concernant le volume de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les niveaux d'émissions atteignables sont présentés plus loin.
- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

À l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de capacité de production réalisable et de matériaux pouvant être utilisés ; il existe donc différentes combinaisons possibles. Tous ces procédés maximisent la réutilisation des résidus tout en minimisant les émissions dans le milieu aquatique. Leurs caractéristiques économiques varient. Certains doivent fonctionner à une capacité élevée pour être rentables, tandis que d'autres ne permettent pas de fournir d'importantes capacités de production.

Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » ; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter de facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un processus ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local.

11.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions tirées pour les meilleures techniques disponibles pour la manutention et le stockage des matériaux sont montrées dans la Section 2.17 de ce document et sont applicables aux matériaux dans ce chapitre.

Le tableau ci-après résume les techniques.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Charbon ou coke	travées couvertes, Silos	Convoyeurs couverts si non pulvérulent. Pneumatique.		
Combustibles liquides. Solvants.	Réservoirs ou fûts dans des enceintes de protection	Conduite sécurisée ou système manuel.		Ventilation en retour des réservoirs de stockage.
Fondants.	Fermé (Silo)	Convoyeurs fermés avec collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange avec les concentrés ou un autre matériau.	
Concentrés, produits intermédiaires	Fermé si formation de poussières	Fermé avec collecte des poussières. Convoyeur fermé ou pneumatique.	Mélange utilisant des convoyeurs. Séchage ou frittage	
Gaz de procédé	Cuves sous pression approuvées	Pompage sécurisé des gaz ou systèmes sous vide		Alarmes à gaz dans les zones de stockage et de procédé.
Poussières fines.	Fermé	Fermé avec collecte des poussières. Pneumatique.	Mélange, Agglomération.	
Poussières grossières (matière première ou laitier granulé)	travées couvertes	Chargeur mécanique.	Broyage ou meulage	Collecte de l'huile si nécessaire
Morceaux (matière première ou laitier).	Ouvert	Chargeur mécanique.	Broyage ou meulage	Collecte de l'huile si nécessaire
Objets entiers	travées ouvertes ou couvertes	Chargeur mécanique.		Collecte de l'huile si nécessaire
Acides : - Déchets acides Acide du produit	Réservoirs résistants aux acides. Réservoirs résistants aux acides.		Vente ou neutralisation. Vente	
Produits - Cathodes, billettes et gâteau. Poudres.	Zone ouverte en béton ou stockage couvert. Fûts ou sacs.			
Résidus du procédé en vue d'une récupération.	Couvert ou fermé en fonction de la formation de poussières.	Dépend des conditions.		Système de drainage approprié.
Déchets destinés à être mis en décharge.	travées couvertes ou fermées ou (fûts) étanches en fonction de l'état physique et chimique du matériau.	Dépend des conditions.		Système de drainage approprié.

Tableau 11.14 : Méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement pour le nickel et le cobalt

11.4.2 Sélection du procédé

Il n'est pas possible de conclure qu'un seul procédé de production puisse être appliqué à toutes les étapes de la production des métaux dans ce groupe.

11.4.2.1 Procédés pyrométallurgiques

Les procédés pyrométallurgiques qui sont décrits comme des techniques à prendre en compte forment la base des MTD. Au moment de la rédaction de ce document, le four de fusion instantanée Outokumpu qui fait partie du procédé DON est considéré comme la MTD pour la fusion des concentrés de nickel quand il est utilisé avec un équipement de collecte et de dépollution efficace. De façon similaire, le four de fusion instantanée INCO et le four électrique étanche avec convertisseur peuvent également être pris en compte.

11.4.2.2 Procédés d'affinage et de transformation

Les procédés d'affinage et de transformation qui sont décrits comme étant des techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD forment la base des MTD quand ils sont utilisés avec des techniques de captage et de traitement efficaces des gaz et des liquides. Le Tableau 11.16 résume les techniques utilisées et les options de traitement.

11.4.3 Collecte et dépollution des gaz

L'utilisation de réacteurs étanches, quand cela est possible pour les étapes de lixiviation et d'extraction par solvants, permet aux gaz et aux vapeurs d'être contenus et réutilisés. Ces techniques sont considérées comme les MTD.

Il y a des cas où le scellement n'est pas possible, par exemple pour les bains de décantation couverts. La collecte des fumées provenant d'un équipement semi-étanche est une composante très importante des MTD puisque la masse des émissions fugitives peut être supérieure aux émissions dépolluées. Ceci est illustré dans le Tableau 11.6.

L'utilisation correcte des techniques de scellement du four et de captage des fumées est également considérée comme une MTD et est associée à l'utilisation de techniques de prévention et de maintenance convenables. Les techniques sont rapportées dans la Section 2.7 et quelques exemples sont donnés dans la section relative aux techniques à prendre en compte.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble de quelques techniques de récupération et de dépollution qui peuvent être utilisées pour les diverses étapes de procédé fonctionnant selon le standard des MTD.

Étape du procédé	Composé dans les effluents gazeux	Option de dépollution
Manutention et stockage des matériaux.	Poussières et métaux.	Stockage, manutention et transfert corrects. Collecte des poussières et filtre à manches si nécessaire.
Broyage, séchage.	Poussières et métaux.	fonctionnement du procédé. Collecte des gaz et filtre à manches.
Fusion et convertissage. (Minerai sulfuré)	Poussières, métaux et dioxyde de soufre.	Collecte des gaz, traitement du gaz et unité de production d'acide sulfurique.
Traitement du laitier.	Poussières et métaux. Dioxyde de soufre. Monoxyde de carbone.	Collecte des gaz, refroidissement et filtre à manches. Laveur. post-combustion.
Lixiviation et affinage chimique.	Chlore.	Collecte et réutilisation des gaz, laveur chimique humide.
Affinage du carbonyle.	Monoxyde de carbone. Hydrogène.	Procédé étanche, récupération et réutilisation. post-combustion et élimination des poussières dans un filtre à manches pour le gaz de queue.
Extraction par solvants.	COV. (dépend du solvant utilisé et doit être déterminé localement pour évaluer les risques possibles).	Confinement, collecte des gaz, récupération du solvant. Adsorption sur matériau carboné si nécessaire.
Affinage thermique.	Poussières et métaux. Dioxyde de soufre.	Collecte des gaz et filtre à manches. Laveur si nécessaire pour le SO ₂ .
Production de poudre	Ammoniac	Collecte et récupération des gaz. Laveur en milieu acide.
Réduction à haute température	Hydrogène.	Procédé étanche, réutilisation. post-combustion.
Extraction électrolytique.	Chlore. Brouillard acide.	Collecte et réutilisation des gaz. Laveur humide. Dévésiculeur.
Fusion et coulée.	Poussières et métaux.	Collecte des gaz et filtre à manches.
Note. * Le dépoussiérage utilisant un filtre à manches peut nécessiter l'élimination de particules chaudes pour éviter les incendies. Les filtres électrostatiques haute température devraient être utilisés dans un système de traitement des gaz avant une unité de production d'acide sulfurique.		

Tableau 11.15: Résumé des options de dépollution considérées comme meilleures techniques disponibles

11.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation de MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions captées/dépolluées provenant de diverses sources, plus les émissions fugitives ou non captées provenant de ces sources. Les systèmes de dépollution modernes, fonctionnant bien, permettent une élimination efficace des polluants et les informations au moment de la rédaction indiquent que les émissions fugitives peuvent être le contributeur principal des émissions totales dans l'air.

a) Pour la fusion des concentrés de nickel, les émissions totales dans l'air sont basées sur les émissions provenant de :

- la réception, le stockage, le mélange et l'échantillonnage des matériaux,
- la fusion, le convertissage et les fours de traitement du laitier avec le système associé de manutention et de traitement des gaz chauds.
- le système de manutention du laitier,

- la zone de refroidissement et de traitement des gaz humides et l'unité de production d'acide sulfurique.
- b) Pour l'affinage de la matte de nickel, les émissions totales dans l'air sont basées sur :
- le procédé de préparation et de broyage de la matte,
 - les étapes de lixiviation et de précipitation,
 - les étapes d'extraction par solvants et de purification,
 - le procédé d'extraction électrolytique.
- c) Pour le procédé d'affinage carbonyle, les émissions totales dans l'air sont basées sur :
- la réception et le stockage des matériaux,
 - les réacteurs d'hydrogénation et d'affinage,
 - les unités de décomposition avec le système associé de manipulation et de post-combustion des gaz.
- d) Pour la production des plaques ou des lingots, les émissions totales dans l'air sont basées sur :
- la réception et le stockage des matériaux,
 - les fours de fusion, d'affinage et de maintien avec le système associé de manutention et de traitement des gaz chauds,
 - les machines de coulée, les unités de fabrication et les équipements auxiliaires.

Des mesures ont été réalisées au niveau d'un four de fusion majeur pour le cuivre/nickel. Les résultats montrent clairement que les émissions fugitives prédomineraient si elles n'étaient pas collectées et traitées (Tableau 11.6). Les tableaux suivants résument les émissions associées à l'utilisation des MTD.

Polluant	Plage associée à l'utilisation de MTD	Techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Poussières	1 - 5 mg/Nm ³	Filtre à manches	Les filtres à manches à haute performance peuvent conduire à de faibles niveaux des métaux lourds. La concentration des métaux lourds est liée à la concentration des poussières et à la teneur des métaux dans les poussières.
NO _x	< 100 mg/Nm ³ < 100 - 300 mg/Nm ³	Brûleur bas NO _x Brûleur d'oxycombustion	Des valeurs plus élevées sont associées à l'enrichissement à l'oxygène pour réduire la consommation d'énergie. Dans ces cas-là, le volume de gaz et l'émission massique sont réduits.
Carbone organique total exprimé en C	< 5 - 15 mg/Nm ³ < 5 - 50 mg/Nm ³	post-combustion. Combustion optimisée.	
Dioxines	< 0,1 - 0,5 ng TEQ/Nm ³	Système hautement efficace d'élimination des poussières (à savoir filtre à manches), post-combustion suivie d'une trempe. D'autres techniques sont disponibles (par exemple adsorption par du charbon actif, catalyseur d'oxydation).	Le traitement d'un gaz propre dépoussiéré est requis pour atteindre des niveaux faibles
<p>Note. Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont exprimées comme des moyennes journalières basées sur une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où il n'est pas possible de mettre en œuvre une surveillance continue, la valeur est la valeur moyenne sur la période d'échantillonnage.</p> <p>Pour le système de dépollution utilisé, les caractéristiques du gaz et des poussières seront prises en compte dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 11.16 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation de MTD pour le prétraitement des matériaux, l'incinération ou la post-combustion, le grillage, la fusion, l'affinage thermique, et la fusion pour la production du nickel et du cobalt

Polluant	Plage associée à l'utilisation de MTD	Techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Brouillards acides Gaz acides Ammoniac	< 50 mg/Nm ³ < 50 mg/Nm ³ < 5 mg/Nm ³	Dévésiculeur Laveur humide basique. Epurateur acide	Un dévésiculeur permettra de réutiliser l'acide collecté.
Chlore	0,5 mg/Nm ³	Collecte et réutilisation. Epurateur alcalin	
CO et carbonyles	5 mg/Nm ³	Régulation du procédé et réacteur étanche.	Pour le procédé carbonyle seulement - Voir ci-dessus pour l'étape d'incinération.
NO _x	< 100 mg/Nm ³	Épuration par oxydation	
COV ou solvants exprimés en C	< 5 - 15 mg/Nm ³	Confinement, condensation, carbone ou bio filtre	
<p>Note. Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont exprimées comme des moyennes journalières basées sur une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où il n'est pas possible de mettre en œuvre une surveillance continue, la valeur est la valeur moyenne sur la période d'échantillonnage.</p> <p>Pour le système de dépollution utilisé, les caractéristiques du gaz et des poussières seront prises en compte dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 11.17 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation de MTD pour la lixiviation, l'extraction chimique et l'affinage, l'extraction électrolytique et l'extraction par solvants pour la production du nickel et du cobalt

Polluant	Plage associée à l'utilisation de MTD	Techniques qui peuvent être utilisées pour atteindre ces niveaux	Commentaires
Effluents gazeux à faible teneur en SO ₂ (~ 1 - 4 %)	> 99,1	Unité de production d'acide sulfurique de contact à simple absorption ou WSA, (la teneur en SO ₂ du gaz de queue dépend de la concentration du gaz entrant)	Pour le SO ₂ gazeux à faible teneur. Combiné à un laveur sec ou semi-sec pour réduire les émissions de SO ₂ et produire du gypse si un marché est disponible.
Effluents gazeux riches en SO ₂ (> 5 %)	> 99,7 % facteur de conversion	Unité de production d'acide sulfurique de contact à double absorption (la teneur en SO ₂ du gaz de queue dépend de la concentration du gaz entrant). Un dévésiculeur peut être approprié pour l'élimination finale du SO ₃	De très faibles niveaux seront atteints pour les autres polluants atmosphériques en raison du traitement intensif des gaz avant l'unité de contact (lavage humide, électrofiltre humide et, si nécessaire, élimination du mercure pour assurer la qualité du produit du H ₂ SO ₄
<p>Note. Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont exprimées comme des moyennes journalières basées sur une surveillance continue pendant la période de fonctionnement. Dans les cas où il n'est pas possible de mettre en œuvre une surveillance continue, la valeur est la valeur moyenne sur la période d'échantillonnage.</p> <p>Pour le système de dépollution utilisé, les caractéristiques du gaz et des poussières seront prises en compte dans la conception du système et la température de fonctionnement correcte sera utilisée.</p>			

Tableau 11.18 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD pour le grillage et la fusion des concentrés de sulfure et des intermédiaires pour la production du nickel et du cobalt

La teneur en métal des poussières varie largement selon les procédés. De plus, pour des fours similaires, il y a des variations importantes en raison de l'utilisation de matières premières variables. Il n'est donc pas approprié de détailler dans le présent document les concentrations atteignables spécifiques pour tous les métaux émis dans l'air. La question est spécifique à chaque site.

Certains métaux ont des composés toxiques qui peuvent être émis à partir des procédés et donc qui doivent être traités pour répondre aux normes spécifiques de qualité de l'air à l'échelle locale, régionale ou transfrontalière. On considère que les faibles concentrations des métaux lourds sont associées à l'utilisation de systèmes de dépollution modernes de haute performance tels qu'un filtre à membrane à condition que la température de fonctionnement soit correcte et que les caractéristiques du gaz et des poussières soient prises en compte dans la conception.

11.4.4 Eaux usées

C'est une question spécifique à chaque site. Toutes les eaux usées seront traitées pour éliminer les solides, les métaux, les huiles et les matières organiques et les composés absorbés et elles doivent être neutralisées si nécessaire. Les principes de base suivants s'appliquent.

- Les cycles d'eau en circuit fermé sont adéquats pour les laveurs humides, les systèmes de refroidissement ;
- La purge provenant des cycles d'eau en circuit fermé doit être traitée pour éliminer la matière particulaire et les composés métalliques de l'eau ;
- Il faut recycler et réutiliser les eaux usées traitées autant que possible ;
- Il faut également traiter et analyser les liquides de lavage avant rejet ;
- Confinement des systèmes de drainage des usines quand cela est possible et traitement des effluents selon leur teneur avec analyse avant rejet.

Pour la production du cobalt et du nickel, les émissions totales dans l'eau sont basées sur :

- le système de traitement ou de granulation du laitier,
- le procédé d'affinage utilisé, le circuit d'extraction électrolytique et la section de lixiviation,
- le système de traitement des eaux usées.

11.4.5 Résidus du procédé

Les procédés de production ont été développés par l'industrie pour maximiser la réutilisation de la majorité des résidus de procédé au sein des unités de production ou pour produire des résidus sous une forme qui leur permette d'être utilisés dans d'autres procédés de production de métaux non ferreux. Le Tableau 11.12 donne une vue d'ensemble des utilisations finales potentielles pour les résidus et quelques quantités spécimens.

La quantité des résidus produits est fortement dépendante des matières premières, en particulier de la teneur en fer des matériaux primaires, de la teneur des autres métaux non ferreux dans les matériaux de première et de deuxième fusion et de la présence d'autres contaminants tels que les matières organiques. Les émissions dans les sols sont donc très spécifiques à chaque site et à chaque matériau et il n'est donc pas possible de produire un tableau réaliste et typique des quantités qui sont associées à l'utilisation de MTD.

Les techniques présentées dans la Section 2.10 pour la minimisation des déchets feront partie des MTD pour ce secteur.

11.4.6 Coûts associés aux techniques

Les données relatives aux coûts ont été compilées pour une variété de variations de procédés et de systèmes de dépollution. Les données relatives aux coûts sont très spécifiques à chaque site et dépendent d'un certain nombre de facteurs mais les plages données peuvent permettre de faire quelques comparaisons. Les données sont fournies en annexe de ce document de sorte que les coûts des procédés et des systèmes de dépollution dans l'ensemble de l'industrie des métaux non ferreux puissent être comparés.

11.5 Technologies émergentes

Divers développements ont été signalés au sujet de l'utilisation de la lixiviation à basse pression et à pression atmosphérique pour la production du nickel à partir de minerais sulfurés. Les principaux procédés sont [tm 142, Finland Ni 1999] : -

- la lixiviation Activox - broyage fin et lixiviation à 100 °C, 10 bar,
- la bio-lixiviation pour le mélange de minerais contenant du cuivre ou de l'or en utilisant des bactéries oxydant le fer et le soufre,
- le procédé CESL - lixiviation avec du chlorure dans une solution de sulfate en utilisant du chlorure ferrique.

Les procédés ont été éprouvés au stade pilote.

- Trois nouvelles usines sont en construction ou sont au stade de la mise en service pour la lixiviation sous pression des latérites utilisant de l'acide sulfurique [tm 142, Finland Ni 1999]. Les procédés sont similaires au procédé établi utilisé à Cuba mais différentes étapes de purification sont utilisées pour enlever les autres métaux. Un procédé de lixiviation atmosphérique avec du chlorure pour les latérites est également en développement.
- Il existe un procédé au stade de la mise en service en Allemagne, destiné à récupérer le nickel et le zinc des résidus en utilisant un four d'oxycombustion et un système d'affinage par extraction par solvants à partir de solutions de sulfate. Les données ne sont pas disponibles au moment de la rédaction de ce document.

12 PROCÉDES DE PRODUCTION D'ELECTRODES EN CARBONE OU EN GRAPHITE ETC.

12.1 Procédés et techniques appliqués

Il y a de nombreux procédés qui sont utilisés pour produire une large gamme de produits en carbone et en graphite. Des électrodes en carbone ou en graphite (anodes et cathodes) et des garnissages de four sont fabriqués pour de nombreux procédés de production de métaux ferreux et non-ferreux, notamment la fusion de l'aluminium primaire, la production des ferroalliages et de l'acier.

Plus de 2000 produits de taille, formes et propriétés différentes sont fabriqués pour d'autres applications.

Tous les procédés utilisent le coke ou le carbone et d'autres matières premières comme le brai pour produire des pâtes, des électrodes et des produits de forme. Le stockage et la manutention des matières premières sont réalisés avec une livraison du coke et des systèmes de manutention en circuit fermé ainsi que des filtres de dépoussiérage intégrés. Les systèmes de livraison et de stockage du brai de houille et du goudron utilisent une ventilation en retour des réservoirs et des condenseurs pour aérer de ces réservoirs. Les principaux types de produits et étapes de procédé sont les suivants :

12.1.1 Procédés de production d'électrodes.

La pâte Söderberg, les électrodes Söderberg, les anodes précuites et les électrodes en graphite sont fabriquées soit dans des installations dédiées, soit dans des procédés associés à la fusion de l'aluminium primaire.

<u>Matière première</u>	<u>Procédé</u>	<u>Produits</u>
Anthracite	Calcination	Anthracite calciné
Coke Additifs (solides)	Stockage, Manutention, Broyage, Tamisage	Fractions de grains de coke Pâtes
Brai Additifs (liquides)	Stockage, Manutention,	Brai Additifs (liquides)
Coke Brai Additifs	Mélange	Pâtes Par ex. pâtes de piquée, pâte Söderberg
Pâte	Mise en forme	Profils non cuits Par ex. électrodes Söderberg
Profils non cuits, profils imprégnés	Cuisson	Profils cuits, par ex. anodes précuites
Profils cuits, brai, résines, autres additifs	Imprégnation	Profils imprégnés
Profils cuits	Graphitisation	Profils en graphite
Profils cuits et graphitisés	Usinage	Composants en graphite et en carbone

Figure 12.1 : Vue générale des phases de procédé [FIGURE : non cuit → cru]

12.1.1.1 Pâte crue, pâte Søderberg, électrodes Søderberg et produits non cuits

La production de pâte crue est le point de départ de la production de l'ensemble des produits en carbone et en graphite. Toutes les pâtes crues sont fabriquées à partir de coke de pétrole calciné mélangé avec jusqu'à 28% de brai de houille qui sert de liant. Les cokes de pétrole sont un résidu de la distillation de pétroles bruts et peuvent par conséquent être contaminés par des substances comme des métaux (par ex. nickel) et des composés soufrés. Des cokes métallurgiques et de lignite hautement recuits sont employés comme agents pour le garnissage. Les cokes calcinés et recuits sont en eux-mêmes exempts d'hydrocarbures et de HAP.

Le coke est normalement transféré par un convoyeur étanche ou par des systèmes pneumatiques à phase dense et stocké en silos. Le brai est transporté à l'état fondu et transféré par pompage puis stocké dans des citernes chauffées, les gaz de ventilation des citernes contiennent des fumées d'hydrocarbures et sont généralement traités. Des condenseurs ou des épurateurs à huile sont employés [tm 77, Al Expert Group 1998] ainsi que des systèmes de ventilation inverse. Le coke de pétrole est broyé puis mélangé avec le brai dans des malaxeurs chauffés. La proportion de coke et de brai est ajustée en fonction de l'application et pour permettre de manipuler la pâte.

Pour la pâte Søderberg, le mélange est produit pour pouvoir l'ajouter à la coque d'électrode. La pâte d'électrode sèche (teneur en brai faible) est préférée pour minimiser la quantité d'hydrocarbures libérés pendant l'utilisation [tm 6, HMIP Al 1993]. La pâte sèche augmente également la conductivité électrique mais une pâte de remplissage des trous de goujon est nécessaire pour les connexions électriques et cette pâte utilise jusqu'à 40% de brai. La pâte Søderberg est normalement employée pour les électrodes dans le secteur de l'aluminium primaire mais la pâte peut être transformée en électrodes par compaction et mise en forme pour une utilisation dans d'autres applications, par exemple dans les fours électriques de production des ferroalliages.

Les électrodes Søderberg sont également fabriquées à partir de la pâte par un procédé de mise en forme. Dans ce cas, les électrodes crues sont façonnées à la taille et à la forme requises et sont vendues [tm 77, Al Expert Group 1998]. Ces électrodes sont couramment utilisées dans les fours à arc électrique immergés. Différentes variantes existent, par exemple des électrodes creuses peuvent être fabriquées pour laisser passer la charge du four à travers l'électrode et des électrodes composites peuvent être fabriquées pour maîtriser les problèmes de production.

12.1.1.2 Anodes précuites, électrodes et produits de forme en carbone

Le procédé d'élaboration primaire de l'aluminium à partir d'anodes précuites emploie des anodes précuites qui sont fabriquées par des ateliers de production d'anode. Les unités de production d'anode peuvent être placées sur le même site que celui comprenant le four de fusion d'aluminium et certaines de ces installations fabriquent des anodes vendues ensuite aux autres usines et procédés. D'autres sites de production dédiés produisent une gamme d'électrodes y compris des cathodes et des garnissages de four.

Ces électrodes sont également fabriquées à partir d'un mélange de coke de pétrole, de 14 à 18% de brai de houille et de matières résiduelles provenant des anodes usagées [tm 77, Al Expert Group 1998; tm 119, VDI 1998].

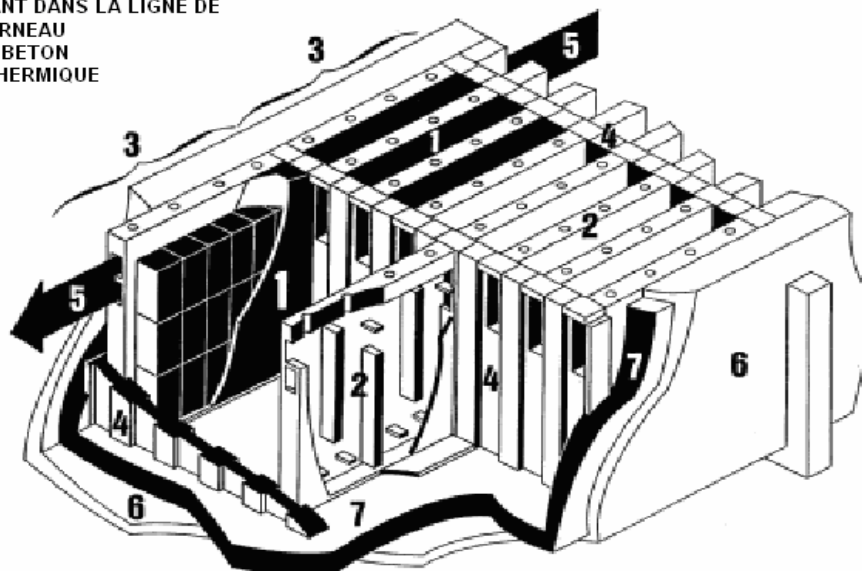
La production des électrodes comprend le concassage, le broyage et le mélange des matières premières. Les matériaux mélangés sont ensuite formés en électrodes crues. Ces électrodes crues sont alors cuites dans des fours à feu mobile comprenant un nombre important de chambres qui contiennent les électrodes. Des cloisons en briques réfractaires séparent les chambres et des gaines sont formées pour l'évacuation des effluents gazeux. Les électrodes crues sont empilées en rangées dans le four d'anode et les conduits de chauffage sont formés. Les couches de coke de remplissage séparent les anodes et évitent l'oxydation. Ce coke est consommé pendant le cycle de chauffage et de refroidissement à un taux de 12 à 18 kg par tonne

d'électrodes, le coke restant est réutilisé. En une seule fois, les chambres des différentes sections du four sont remplis, chauffés, refroidis ou vidés [tm 93, PARCOM 1992].

De l'air chaud passe entre les cloisons à l'aide de brûleurs mobiles fonctionnant au gaz et les électrodes sont cuites à 1100°C en l'absence d'air. Les conduites sont maintenues sous pression négative pour contenir les fumées. En fin du cycle de chauffage, les conduites sont raccordées à des ventilateurs pour refroidir la section. L'air chaud sortant de la section du four en train d'être refroidie est alors recyclé par les brûleurs ou par d'autres sections du four pour préchauffer cette partie du système.

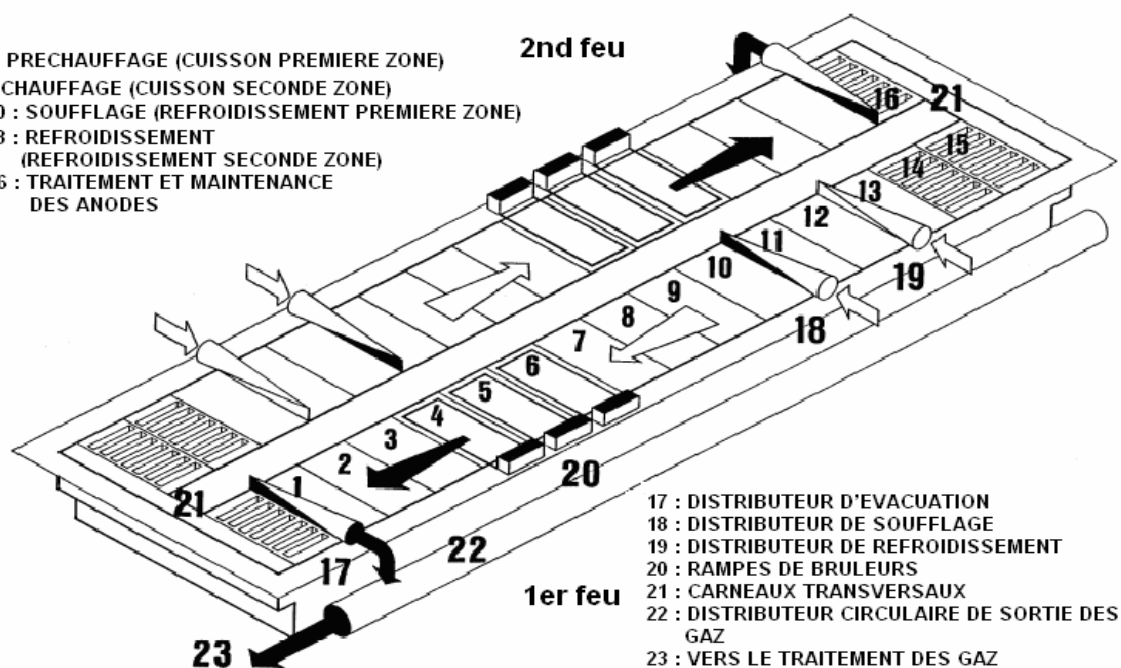
VUE DES SECTIONS D'UN FOUR DE CUISSON DE TYPE OUVERT

1. PUIT (ANODE + COKE DE REMPLISSAGE)
2. PAROI DE CARNEAU
3. SECTION
4. PAROI PRINCIPALE
5. GAZ CIRCULANT DANS LA LIGNE DE
6. ENCEINTE EN BETON
7. ISOLATION THERMIQUE



VUE D'UN FOUR DE CUISSON DE TYPE OUVERT

- 1/2/3 : PRECHAUFFAGE (CUISSON PREMIERE ZONE)
- 4/5/6 : CHAUFFAGE (CUISSON SECONDE ZONE)
- 7/8/9/10 : SOUFFLAGE (REFROIDISSEMENT PREMIERE ZONE)
- 11/12/13 : REFROIDISSEMENT (REFROIDISSEMENT SECONDE ZONE)
- 14/15/16 : TRAITEMENT ET MAINTENANCE DES ANODES



- 17 : DISTRIBUTEUR D'EVACUATION
- 18 : DISTRIBUTEUR DE SOUFFLAGE
- 19 : DISTRIBUTEUR DE REFROIDISSEMENT
- 20 : RAMPES DE BRULEURS
- 21 : CARNEAUX TRANSVERSAUX
- 22 : DISTRIBUTEUR CIRCULAIRE DE SORTIE DES GAZ
- 23 : VERS LE TRAITEMENT DES GAZ

Figure 12.2 : Vues générales d'un four de cuisson d'anodes ouvert

Deux types de four sont employés pour la cuisson d'anode ; des fours à feu mobile ouverts et fermés. Les fours ouverts emploient un conduit horizontal et les fours fermés un conduit vertical. Les fours ouverts représentent 60% de la capacité de production. Les passages horizontaux du four ouvert sont séparés et parallèles, ce qui permet d'optimiser le cycle de chauffage pour chaque conduite et de réduire ainsi la consommation de combustible [tm 93, PARCOM 1992]. L'utilisation de chambres multiples dans le four permet d'utiliser la chaleur d'une section dans les autres sections, comme indiqué ci-dessous.

TEMPERATURE DU GAZ ET REGULATION DU FLUX DE GAZ

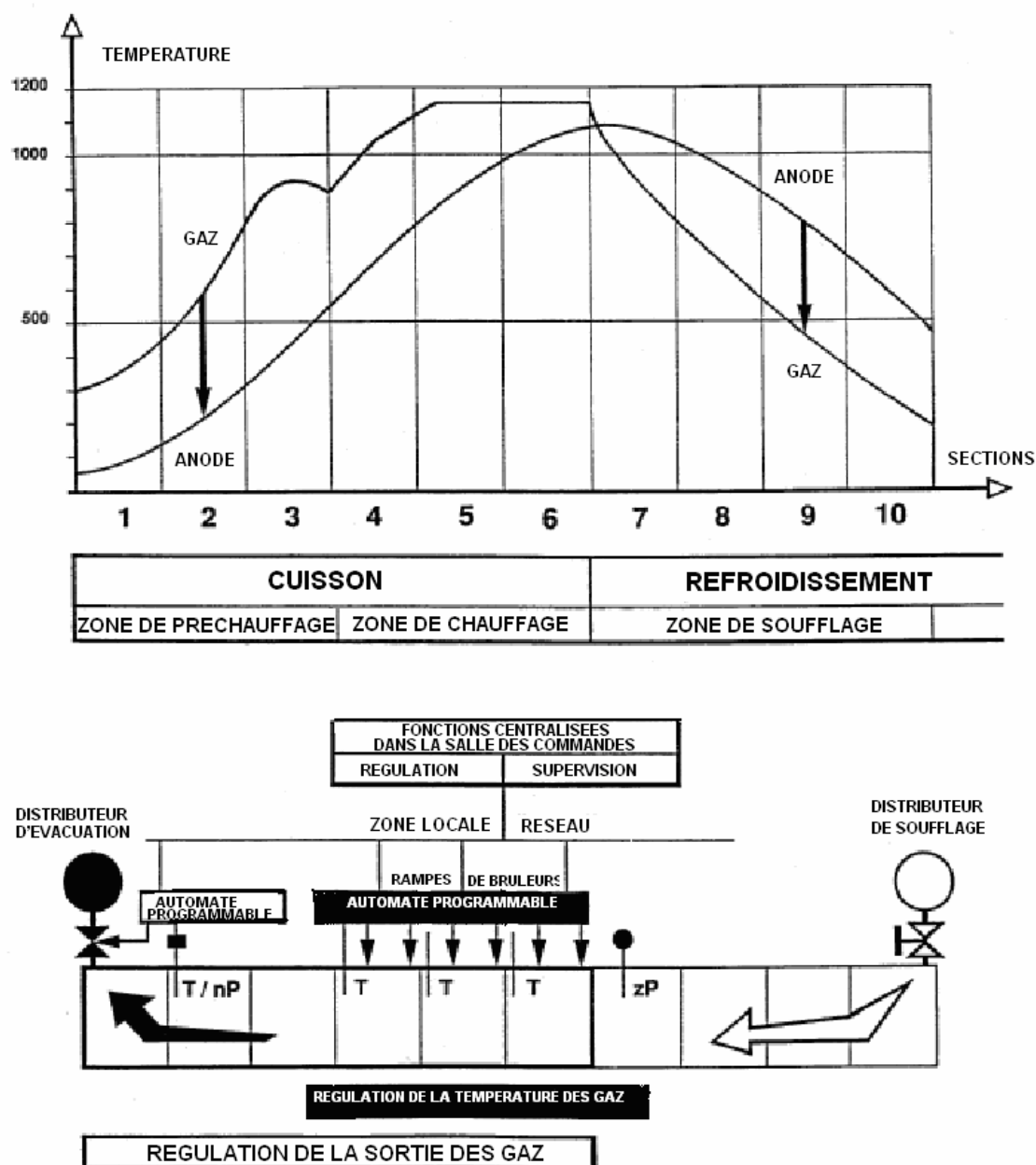


Figure 12.3 : Profil de température pendant la cuisson des anodes

Pendant le procédé de cuisson, le brai de houille est converti en coke, rendant le matériau électriquement conducteur. Il se produit une perte de poids de 5% pendant la cuisson [tm 77, Al Expert Group 1998], le procédé de cuisson dure approximativement 18 à 21 jours.

Dans le secteur de l'aluminium, les anodes précuites sont raccordées à l'arrivée positive du courant à l'aide d'ensembles métalliques comportant chacun une tige et des pattes. Ceux-ci sont fixés dans l'anode dans un atelier de scellement à l'aide de fonte, ce qui permet de placer les anodes dans la partie haute de la cuve d'électrolyse à l'aide de crochets. Les anodes sont consommées pendant l'électrolyse et doivent être remplacées une fois que 80% environ de l'anode est consommé [tm 6, HMIP Al 1993; tm 29, PARCOM 1997]. Les résidus d'anode (20% du poids d'origine de l'anode) sont réutilisés pour la production d'anode après que l'électrolyte résiduel a été enlevé. Les ensembles anodiques métalliques sont reconditionnés pour une utilisation ultérieure bien qu'une faible proportion soit mis au rebut en cas de corrosion.

12.1.1.3 Électrodes en graphite

Le procédé de production des électrodes en graphite (anodes et cathodes) est très similaire à la production des électrodes précuites ; normalement, aucun matériau d'anode résiduel n'est utilisé dans le mélange.

Les produits crus sont tout d'abord cuits, la température de cuisson employée est $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la perte de poids pendant la cuisson est augmentée à 15%.

Des fours à chambre unique ou à alvéole sont utilisés ainsi que des fours à feu mobile fermés pour la phase de cuisson pendant la production d'électrodes en graphite. Des fours à tunnel sont employés pour la production à petite échelle de carbones de spécialité.

Le matériau d'électrode cuit est alors soumis à imprégnation avec du brai, à un recuit et à une graphitisation.

L'usinage et la finition complètent la production des électrodes en graphite.

Le graphite est formé lorsque le carbone précuit est chauffé à environ $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$. La graphitisation des électrodes est généralement réalisée dans des fours Acheson ou Castner.

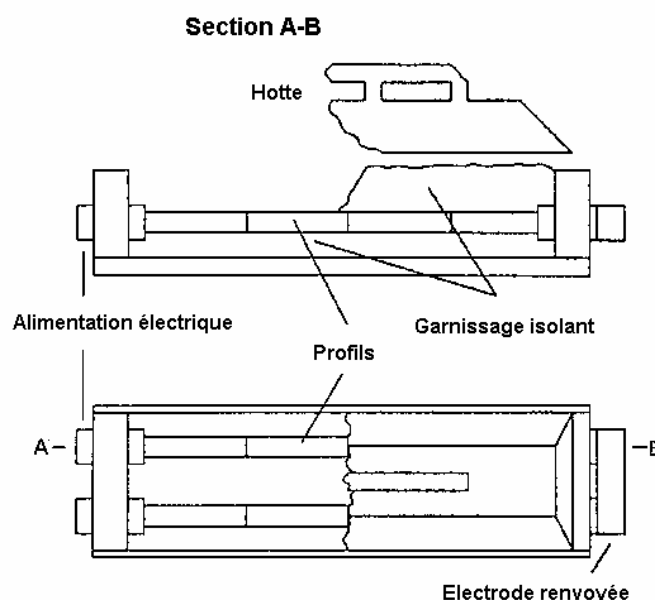


Figure 12.4 : Four de graphitisation Castner

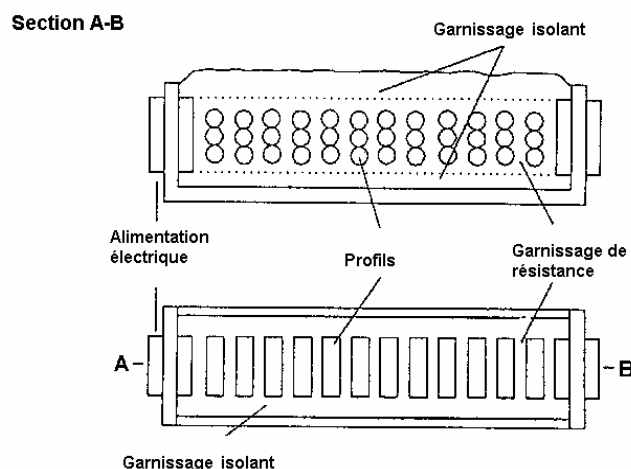


Figure 12.5 : Four de graphitisation Acheson

Dans certains cas, on n'utilise aucune hotte lorsque les émissions de poussières fugitives sont très faibles et que les oxydes de carbone sont bien dispersés au niveau de la toiture.

Le four Acheson est employé pour les produits de forme en carbone aux dimensions et sections irrégulières et le four Castner est utilisé pour les produits avec des faces parallèles et des sections régulières. Ces deux types de fours sont des fours à résistance électrique construits dans un matériau réfractaire. Ils diffèrent dans la manière dont le courant est appliqué au four. Dans le four Acheson, les produits sont placés à l'intérieur du corps du four et les interstices sont remplis d'un mélange carbone/graphite (remplissage de résistance), le courant passe à travers le garnissage de résistance et les produits. Dans le four Castner, les produits forment la totalité du trajet du courant et peuvent conduire à des gains d'efficacité électrique.

Dans le four Acheson, l'isolation thermique est fournie par un mélange de carbure de silicium, de coke, de sciure et de sable. Dans le four Castner, seul du coke est utilisé. Les cycles de chauffage varient de 2 à 7 jours et le cycle de refroidissement dure jusqu'à 14 jours. À la fin du cycle, l'isolation et le garnissage de résistance sont traités et réutilisés [tm 119, VDI 1998].

Les produits graphitisés sont finis au tour, à la perceuse et à la fraiseuse et par des procédés similaires selon les exigences des clients. Les produits finis sont ensuite polis. Les poussières produites par ces procédés sont captées et réutilisées dans la mesure du possible. Le procédé spécifique est fonction du produit final.

Ces électrodes sont employées dans les fours à arc électrique dans différents procédés. Les garnissages de four sont également fabriqués dans le même procédé et peuvent être employés dans les cuves de production d'aluminium comme cathodes (les blocs de cathode peuvent être fabriqués à partir de matériau pré-cuit, de graphite ou d'un mélange de matériau pré-cuit/graphite). Des cathodes en carbone sont également employées dans les fours à arc électrique.

12.1.2 Procédés de production des autres produits en carbone et en graphite

Les autres produits en graphite comme les joints, les brosses, les creusets et produits similaires sont produits de la même manière que les électrodes en graphite. Il existe des différences de taille et de complexité des produits et cela a une influence sur les procédés employés. D'autres additifs comme le

soufre et des métaux peuvent être ajoutés au mélange de matières premières afin d'obtenir les propriétés physiques désirées du produit. Des résines sont parfois employées à la place du brai.

Les phases de broyage et de mélange sont importantes car il existe une très grande variété de produits en graphite et de spécifications. Les caractéristiques de ces produits sont souvent fonction d'une taille de grain particulière. La technique de broyage et de fraisage est choisie en fonction de la taille des particules de carbone requise pour un produit spécifique. Les profils crus sont formés par moulage et ils peuvent être cuits, recuits et graphitisés.

Le chauffage des produits à 2800 °C produit du graphite qui est alors soumis à plusieurs procédés de finition comme l'usinage et le polissage [tm 119, VDI 1998].

Les composants cuits ou graphitisés peuvent être imprégnés avec d'autres matériaux par ex. des résines ou des métaux. L'imprégnation est réalisée par « trempage », parfois sous vide ou sous pression, des autoclaves sont aussi utilisés. Les composants qui ont été imprégnés ou liés avec du brai de houille sont recuits. Si la liaison a été réalisée par résine, ils subissent un traitement thermique.

Du graphite poreux est également produit dans le procédé de base en mélangeant de la sciure aux matières premières. Pendant la cuisson, la sciure est brûlée et il reste une matrice poreuse en carbone ou en graphique.

Le graphite haute pureté est produit de la même façon mais le procédé de graphitisation est utilisé pour retirer les impuretés incluses comme les métaux. Dans ce cas, des Fréons sont utilisés dans l'écoulement gazeux et ils se décomposent pour produire du chlore et du fluor qui réagissent avec les impuretés métalliques pour former des sels volatiles éliminant ainsi les métaux du graphite. La pratique courante comprend l'utilisation de Fréons qui sont récupérés dans des appareils et le procédé offre par conséquent une méthode utile pour traiter ces substances. Les halogènes en excès et les sels métalliques sont éliminés des effluents gazeux par une épuration voie sèche.

Des produits spéciaux comme le carbone renforcé en fibres de carbone (CFRC), les fibres de carbone et les tissus en carbone sont également fabriqués et un four à induction ou à chambre est employé. Les procédés employés pour fabriquer les fibres de carbone et les matériaux associés peuvent inclure l'acrylonitrile comme précurseur pour former du tissu de Poly(Acrylonitrile) (tissu PAN) ou comme agent d'imprégnation [tm 131, Davies 1998]. Dans ces cas, des cyanures d'hydrogène et de sodium peuvent être produits pendant les phases de chauffage dans un four. Le cyanure de sodium peut être converti en carbonate de sodium à hautes températures en présence d'oxydes de carbone. Une post-combustion est utilisée pour oxyder les gaz émis.

Les phases de procédé sont décrites plus en détail ci-après et sont également montrées dans le diagramme ci-après.

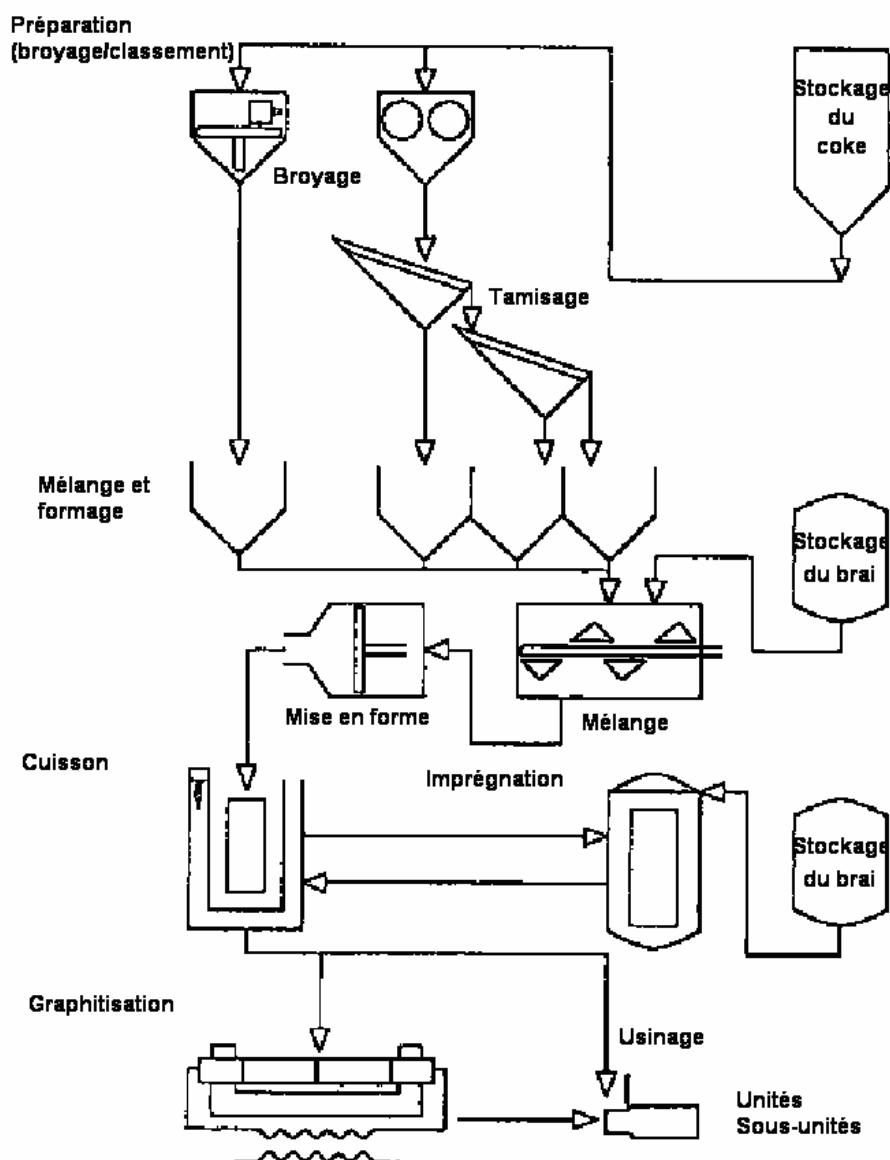


Figure 12.6 : Production de produits de forme en graphite [FIGURE : classement → classification, formage → mise en forme]

12.1.2.1 Mélange et mise en forme

Les matières premières sont mélangées pour former une alimentation constante et des systèmes de pesée sont employés pour réaliser une formulation spécifique en fonction du produit. Différents malaxeurs sont utilisés en fonction du produit requis, de la taille des particules des matières premières et de la quantité à produire. Des malaxeurs chauffés et des convoyeurs à vis (généralement à 200 °C) sont employés pour éviter que les lots ne se solidifient et permettent une évacuation efficace des contenus. Des malaxeurs à pétrissage, à palette et à action continue sont employés. Le fonctionnement continu ou discontinu est pratiqué et peut dépendre de l'échelle de l'opération.

Le mélange cru passe dans un procédé de mise en forme pour obtenir les formes désirées. Des systèmes de moulage en moule, d'extrusion et de vibration sont employés. Pendant la production du carbone spécial, les produits crus peuvent être lavés à l'alcool pour retirer la résine en excès. Les produits de grande taille peuvent être refroidis dans un bain d'eau en circuit fermé.

12.1.2.2 Cuisson et traitement de recuit

Les produits crus (ou produits imprégnés) sont cuits à des températures pouvant aller jusqu'à 1300 °C en utilisant différents types de fours comme des fours à tunnel, à chambre unique, à chambres multiples, annulaires et à tiges poussées, en fonction de la taille et de la complexité du produit. La cuisson en continu est également réalisée. Le fonctionnement des fours est similaire à ceux utilisés pour la cuisson des électrodes mais les fours sont généralement plus petits.

Le four à tunnel est alimenté en produits pré-formés qui sont transportés à travers la zone de combustion dans une nacelle métallique entourée d'un matériau de garnissage. Le four est généralement chauffé au gaz ou au fuel et un récupérateur est généralement intégré pour préchauffer le combustible ou l'air de combustion.

12.1.2.3 Imprégnation

Des goudrons, des brais, des résines et des métaux fondus (Si, Sb) peuvent être ajoutés aux produits cuits et d'autres réactifs sont utilisés pour remplir les cavités formées dans le matériau carbonisé. Le trempage avec ou sans vide et la mise en autoclave sont employés. Différentes techniques d'imprégnation sont employées en fonction du produit mais les fonctionnements sont discontinus ou quasi-continus. Le cycle d'imprégnation comprend généralement le préchauffage, l'imprégnation et le refroidissement. Un réacteur durcissant peut être également utilisé.

Seuls les carbones spéciaux sont imprégnés avec différents métaux.

12.1.2.4 Graphitisation

Le graphite est formé lorsque le carbone précuit est chauffé à environ 2800 °C. La graphitisation est réalisée dans des fours à tunnel, Acheson, Castner ou à induction en fonction de la taille ou de la forme du composant et de la matière première employés. D'autres fours spécialisés sont aussi employés, par exemple le four de graphitisation sous vide pour les produits spéciaux comme les composites de carbone.

Le four Acheson est employé pour les produits en carbone aux dimensions et sections irrégulières et le four Castner est utilisé pour les produits avec des faces parallèles et des sections régulières. Ces deux fours sont des fours à résistance électrique construits dans un matériau réfractaire. Ils diffèrent dans la manière dont le courant est appliqué au four. Dans le four Acheson, les produits sont placés à l'intérieur du corps du four et les interstices sont remplis d'un mélange carbone/graphite (garnissage de résistance), le courant passe à travers le garnissage de résistance et les produits. Dans le four Castner, les produits forment la totalité du trajet du courant et peuvent conduire à des gains d'efficacité du courant. Dans le four Acheson, l'isolation thermique est fournie par un mélange de carbure de silicium, de coke, de sable et parfois de sciure. Dans le four Castner, seul du coke est utilisé. Les cycles de chauffage varient de 2 à 7 jours et le cycle de refroidissement dure jusqu'à 14 jours. La consommation d'énergie est de 9 à 20 GJ/t. A la fin du cycle, l'isolation et le garnissage de résistance sont traités et réutilisés [tm 119, VDI 1998].

12.1.2.5 Mise en forme du produit

Le sciage, le tournage, le perçage, le fraisage et des procédés similaires sont employés pour transformer les produits en graphite. Les produits finis sont ensuite polis. Les poussières produites par ces procédés sont collectées et réutilisées dans la mesure du possible. Le procédé spécifique est fonction du produit final.

12.1.2.6 Procédés spéciaux

D'autres procédés comme l'imprégnation par résine ou métal, l'expansion du graphite et la formation de fibres de carbone à l'aide d'un traitement à chaleur contrôlée sont également employés. Une gamme de procédés sur mesure sont employés mais ne sont pas reportés dans le présent document.

12.2 Niveaux actuels d'émissions et de consommations

Environ 40% du brai de houille est volatilisé pendant la cuisson et plus de 95% des hydrocarbures volatils sont brûlés à la température élevée dans le four. La cuisson produit donc une émission résiduelle d'hydrocarbures et d'HAP du fait de leur présence dans le brai de houille. La figure suivante montre les points d'émission potentiels des différentes phases de procédé.

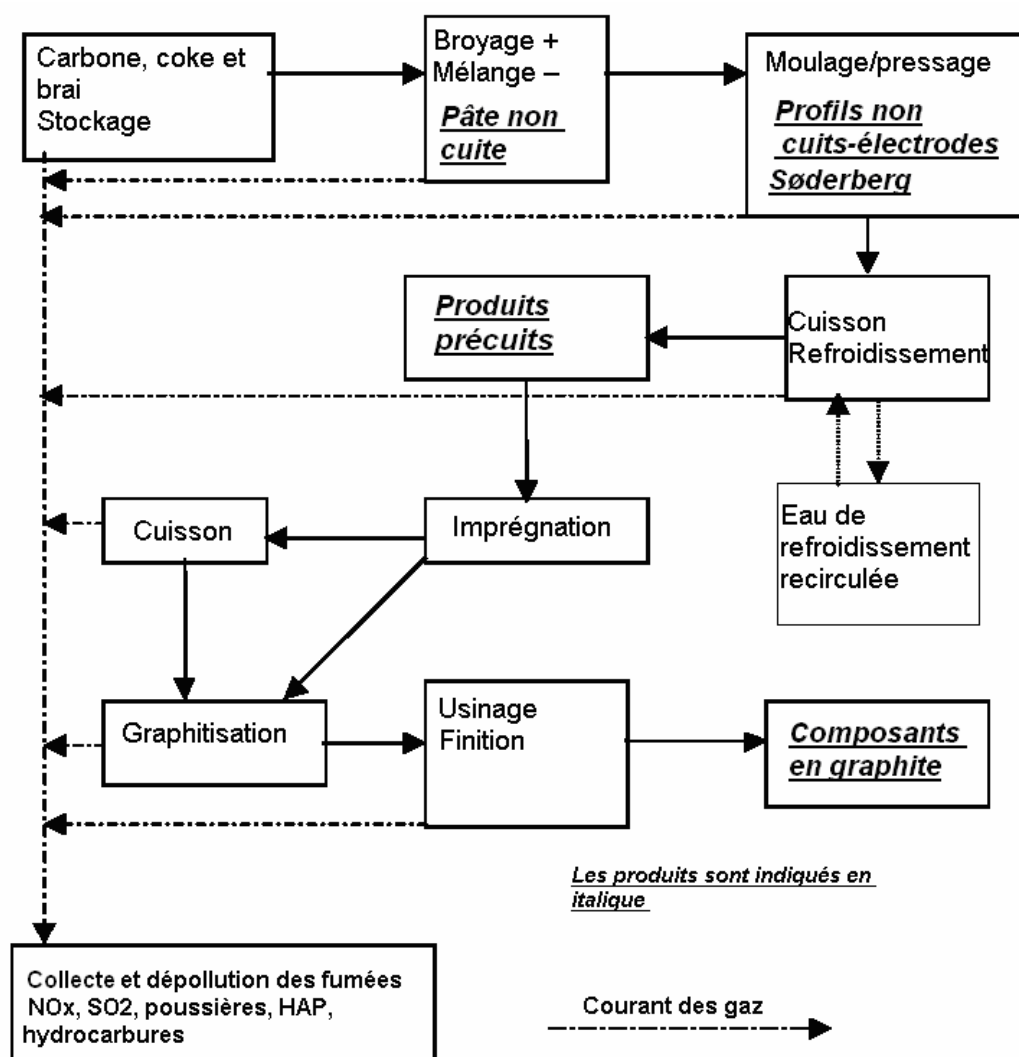


Figure 12.7 : Diagramme des émissions génériques des procédés employés [FIGURE : pressage → compaction]

Les gaz du four sont traités par post-combustion, par épuration par voie humide, par épuration par voie sèche à l'aide de coke, par filtres électrostatiques humides et pour la production d'électrodes sur un site de fusion d'aluminium primaire, par contact avec de l'alumine dans un système d'épurateur/filtre à manches [tm 77 & 90, Al Expert Group 1998]. Les poussières provenant de la manutention et des procédés mécaniques sont collectées dans des filtres à manches. Les solvants des phases de lavage de la production de carbone spécial sont captés et réutilisés si possible ou retirés dans des biofiltres.

La consommation d'énergie pour la production d'anode est de ~ 2300 MJ par tonne et s'explique par le combustible utilisé. Il se produit également des pertes à l'électrode, au niveau du coke de remplissage, des réfractaires et des fumées, le total équivaut à 5500 à 6000 MJ par tonne [tm 93, PARCOM 1992]. Le coke de garnissage est consommé à une vitesse de ~ 12 à 18 kg par tonne d'électrodes [tm 119, VDI 1998]. La consommation d'énergie de la graphitisation est de 9 à 20 GJ/t.

12.2.1 Émissions dans l'air

Le procédé peut produire des émissions soit canalisées soit fugitives en fonction de l'âge de l'installation et de la technologie employée. Les émissions canalisées sont généralement surveillées en continu ou périodiquement selon le composé mesuré et déclarées aux autorités compétentes par le personnel du site ou par des consultants hors-site.

Il existe des émissions potentielles dans l'air d'hydrocarbures et de HAP, de dioxyde de soufre, de poussières, de fluorures (uniquement pour la production d'anodes si les anodes usagées font partie de la source de carbone), d'hydrocarbures (si des solvants sont employés) et de cyanure (uniquement pour la production de fibres à partir d'acrylonitrile). La formation du SO_2 est influencée par le combustible et les matières premières employés alors que la formation de NO_x est déterminée par la température de combustion.

Lorsqu'une unité de fabrication d'anode est associée à un four de fusion d'aluminium primaire, les gaz de procédé peuvent être combinés aux gaz venant des cuves d'électrolyse pour réagir avec de l'alumine dans un épurateur voie sèche. Un filtre à manches sert d'épurateur et l'alumine collectée est utilisée dans les cuves d'électrolyse. Les données relatives aux procédés combinés sont intégrées dans les données déclarées dans le chapitre 4.

Dans les procédés autonomes ou les autres procédés de production de carbone et de graphite, des combinaisons de techniques comme les unités de post-combustion, les filtres électrostatiques et à manches sont employées. Les filtres utilisant du coke ont été recommandés [tm 29, PARCOM 1997] mais il a été conclu que la fraction de goudron émise par la cuisson est la fraction condensable légère. Celle-ci peut ne pas être totalement carbonisée durant les premières phases consécutives de la cuisson du coke (ou si elle a été formée en pâte Söderberg). La figure suivante montre le devenir des différentes fractions.

Fraction gazeuse ~ 30%	- Brûlée dans le procédé
Fraction condensable ~ 25%	- Captée pendant la dépollution
Fraction carbonisée ~ 45%	- Formée en produit

Figure 12.8 : Devenir des fractions de brai de houille

Il est donc fort possible que toutes les fractions condensables ne puissent pas être collectées si l'absorption sur du coke seulement est employée pour les phases de cuisson. Une part importante des goudrons peut être recyclée à partir du média filtrant constitué par le coke pendant le gradient de température de la phase de préchauffage du four de cuisson (fig. 12.3). Lorsque l'alumine est employée comme réactif d'épuration dans un procédé de production d'aluminium associé, il a été reporté que les hautes températures constantes du bain de la cellule électrolytique peuvent détruire tous les hydrocarbures qui ont été collectés sur l'alumine recyclée à condition qu'elle ne soit pas utilisée comme matériau pour couvrir le bain [EAA]. Un

filtre utilisant du coke est approprié pour les étapes de mélange et de mise en forme lorsque le brai n'a pas été décomposé.

12.2.1.1 COV, hydrocarbures et HAP

La pâte pour les anodes d'autres électrodes et la plupart des produits en carbone spécial sont produits à partir du coke de pétrole et du brai de houille. Des émissions d'hydrocarbures sous forme de goudrons peuvent se produire pendant la réception, le transfert, le mélange et la cuisson. Le brai de houille contient également des HAP qui seront également émis. Les HAP sont potentiellement dangereux dans l'environnement comme à l'intérieur des installations industrielles et constituent un problème important pour l'industrie du carbone. D'après une enquête réalisée en 1989, l'émission totale (non contrôlée) de HAP par la cuisson d'anode est de 0,432 kg par tonne d'anode [tm 29, PARCOM 1997]. Dans les usines modernes, les émissions provenant du malaxage et de la cuisson sont par conséquent épurées par ex. dans des systèmes de condensation puis des systèmes d'épuration par voie sèche employant de l'alumine dans une installation associée à un four de fusion d'aluminium primaire ou du coke/de la chaux, où les hydrocarbures et les HAP sont renvoyés au procédé de production [tm 119, VDI 1998]. En variante, des unités de post-combustion et des filtres électrostatiques humides peuvent être employés en fonction du site et de l'échelle de production.

12.2.1.2 Poussières

Des émissions de poussières se produisent pendant toutes les phases des procédés de production (stockage, transfert, mélange, broyage, cuisson, graphitisation et mise en forme). Les émissions sont principalement dues aux poussières générées durant le broyage, le tamisage et la mise en forme et aux gaz de carbonisation. La manutention mécanique et les phases de traitement sont généralement réalisés sous abri et munis d'une extraction [tm 119, VDI 1998]. La source des poussières et leurs caractéristiques influencent la méthode de dépollution employée pour les éliminer, les poussières de carbone peuvent être très fines et abrasives.

Pour la fabrication des produits en carbone et en graphite spéciaux, des filtres absolus sont parfois employés pour éliminer ces poussières ; l'air propre est alors utilisé sur le lieu de travail.

Les techniques et les émissions atteignables sont décrites au Chapitre 2.

12.2.1.3 Gaz de combustion

Des gaz issus de la combustion de gaz ou de fuel vont être émis par le procédé. Il existe des émissions potentielles d'oxydes de carbone et d'oxydes de soufre et d'azote. L'optimisation des conditions de combustion et l'emploi de brûleurs bas NO_x est une pratique courante et le combustible est choisi selon les conditions du site.

12.2.1.4 Dioxyde de soufre

Les matières premières à partir desquelles les produits sont fabriqués contiennent du soufre et le combustible employé pour chauffer peut également en contenir. Cela provoque une émission de dioxyde de soufre pendant la cuisson [tm 6, HMIP Al 1993]. Les émissions de SO_2 se situent dans la plage de 0,5 (gaz) à 2 kg (fuel) par tonne d'aluminium en fonction du combustible (basées sur une consommation d'anode de 0,4 tonne par tonne d'aluminium). Cela est beaucoup moins important que les émissions de dioxyde de soufre produites pendant l'électrolyse [tm 100, NL Al 1998]. Du soufre est également ajouté au

mélange pour conférer les caractéristiques désirées aux produits spéciaux en graphite. Cela peut constituer une source importante de dioxyde de soufre et des épurateurs voie humide sont utilisés pour l'éliminer.

12.2.1.5 Fluorures (production d'anode si des restes d'anode sont utilisés)

Des fluorures sont émis lorsque des anodes usagées provenant du procédé d'électrolyse d'aluminium sont employées dans le mélange pour la production d'anodes. Les anodes usagées sont légèrement contaminées par les fluorures venant de l'électrolyte. Les émissions de fluorures particulières provenant des unités de cuisson d'anode sont négligeables. Les émissions d'HF provenant de la cuisson d'anodes (si épuration) sont égales à environ 1% des émissions générées par l'électrolyse d'aluminium [tm 100, NL AI 1998].

12.2.1.6 COV (fabrication de produits spéciaux en carbone et en graphite)

Des COV peuvent être émis par la mise sous-vide et d'autres systèmes employés pour l'imprégnation. Des techniques de post-combustion ou d'adsorption sont utilisées pour les contrôler [tm 119, VDI 1998]. Les phases de lavage et de séchage du carbone spécial emploient des solvants comme l'éthanol. Ces substances sont des sources potentielles d'odeurs et sont généralement retirées à la source. Des biofiltres sont employés pour absorber et décomposer les composés organiques et éliminer les odeurs des effluents gazeux. Les gaz sont pré-humidifiés et passent généralement à travers des filtres en série. Les biofiltres fonctionnent en discontinu et le substrat biologique (tourbe, rameaux etc.) est remplacé régulièrement.

12.2.1.7 Cyanures (production de fibres de carbone à base de poly(acrylonitrile)-PAN)

Les cyanures sont produits pendant la décomposition de l'acrylonitrile (dans du tissu PAN) utilisé pour la production des fibres de carbone. Des concentrations de HCN de 55 mg/Nm³ ont été déclarées pendant les périodes où la dépollution n'était pas disponible [tm 131, Davies 1998]. Une post-combustion est employée pour décomposer le cyanure d'hydrogène.

Du cyanure de sodium peut également se former si du thiocyanate de sodium est utilisé comme solvant pour l'acrylonitrile. Dans ce cas, le sodium est éliminé de la fibre de carbone pendant la phase de traitement à haute température et du cyanure de sodium solide est formé pendant le refroidissement. En présence de CO₂ à hautes températures, il est principalement converti en carbonate de sodium.

12.2.1.8 Dioxines

Les résultats des tests actuels sur les sources d'émissions et les unités de dépollution dans ce secteur indiquent que les dioxines ne sont pas pertinentes pour les procédés conventionnels de fabrication du carbone et du graphite. Cela devra faire l'objet d'une évaluation si des composés ou des additifs chlorés sont employés.

12.2.1.9 Résumé des principaux polluants émis dans l'air

Composé	Teneur dans les gaz bruts (kg/t d'aluminium*)	Remarques
Fluorures (à l'état gazeux)	0,05 – 0,6	Les émissions de fluorures solides sont généralement négligeables.
HAP	0,15 – 0,5	Estimation basée sur une perte de masse d'environ 5 % lors de la cuisson
Hydrocarbures	25-40	
Poussières	5-10	Estimation
Note – Pour un procédé associé à la production d'aluminium primaire. Masses des différents polluants dans les gaz bruts. Le traitement des émissions captées s'effectue dans l'épurateur à alumine / le filtre à manches utilisé pour réduire les gaz émis lors de l'électrolyse.		

Tableau 12.1 : Gaz bruts émis lors de la production d'anodes dans une installation associée à un four de fusion d'aluminium primaire

Composé	Plage d'émissions-type	Commentaires
Fluorure [kg/t]	0,01 – 0,1	
Poussières [kg/t]	0,01 – 1,0	
BaP [g/t]	0,0015 – 3,0	
SO ₂ [kg/t]	0,1 – 6,0	
NO _x [kg/t]	0,1 – 0,4	

Tableau 12.2 : Émissions en masse associées à la production d'anodes précuites

Source	Technique de dépollution	Polluant	Plage de concentration [mg/Nm ³]
Stockage et manutention des matériaux - coke	Cyclone	Poussières	20 – 150
	Filtre à manches	Poussières	1- 90
Stockage et manutention des matériaux - brai	Ventilation secondaire, condensation	Hydrocarbures	1- 75
Broyage et malaxage	Unité de post-combustion	Poussières	1- 15
		Hydrocarbures	1- 100
		HAP VDI _{I+II}	0,007 - 8,0
		Benzène	0,06 - 0,25
	Adsorbeur	Poussières	1 – 50
		Hydrocarbures	19 – 150
		HAP VDI _{I+II}	0,1 – 1,0
	Épurateur	Poussières	10 – 50
		Hydrocarbures	20 – 150
		HAP	0,1 – 1,0
Cuisson et recuit	électrofiltre	Poussières	2,5 – 90
		Hydrocarbures	50 – 250
		HAP	0,003 – 6
		Benzène	1 – 11
	Unité de post-combustion (dispositif d'oxydation thermique classique - CTO)	Poussières	1 – 40
		Hydrocarbures	2 – 17
		HAP VDI _{I+II}	0,003 – 0,2
		Benzène	0,15 – 7,5
		SO ₂	20 – 100
		NO _x	50 – 250
	Unité de post-combustion (dispositif d'oxydation thermique à récupération de chaleur - RTO)	Poussières	1 – 60
		Hydrocarbures	6 – 100
		HAP VDI _{I+II}	0,01 – 0,5
		Benzène	0,1 – 3,5
		SO ₂	2 – 150
		NO _x	10 – 40
	Épurateur par voie sèche (alumine ou carbone/chaux)	Poussières	<1 – 14
		Hydrocarbures	1 – 135
		HAP	0,002 – 55
Imprégnation	Unité de post-combustion (dispositif d'oxydation thermique classique - CTO)	Poussières	1 – 40
		Hydrocarbures	3,5 – 7,5
		HAP	0,0002 – 0,2
		Benzène	0,4 – 7,5
		SO ₂	20 – 100
		NO _x	50 – 250
	Refroidisseur et filtre	Poussières	1 – 4
		Hydrocarbures	4 – 40
		HAP VDI _{I+II}	0,001 – 0,1
Graphitisation	Filtre à manches	Poussières	1 – 20
		Hydrocarbures	1 – 25
Usinage et façonnage	Filtre à manches	Poussières	1 – 35
		Hydrocarbures	1 – 25

Tableau 12.3 : Plages d'émissions associées à quelques procédés de production du carbone et du graphite

La post-combustion régénérative (dispositif d'oxydation thermique à récupération de chaleur) est encore en phase de développement.

Composé	Calcination	Stockage et manutention	Broyage et meulage	Malaxage et mise en forme	Cuisson	Imprégnation	Graphitisation	Usinage
SO ₂	•• ^{1&2}				•• ^{1&2}		•• ²	
Halogénures		• (si les anodes sont récupérées)	• (si les anodes sont récupérées)	• (si les anodes sont récupérées)	• (si les anodes sont récupérées)		•• ³	
Hydrocarbures (dont HAP)	•	••• ⁵ • ⁶	•	••	•••	•••		
Cyanure					•• ⁴		•• ⁴	
NO _x					•• ²		•• ²	
Poussières	•	••	•••	••	•		••	•••
<p>••• Plus important.... • Moins important</p> <p>1 Avec des matières premières contenant du soufre</p> <p>2 Gaz de combustion</p> <p>3 Avec du graphite à haut degré de pureté</p> <p>4 Avec des fibres de carbone</p> <p>5 Concentrations élevées lors du chargement – brai solide.</p> <p>6 Concentrations élevées lors du chargement – brai liquide.</p>								

Tableau 12.4 : Importance des émissions potentielles dans l'air générées par la production de carbone et de graphite

Les valeurs relatives aux HAP présentent un certain degré d'incertitude. Il existe plusieurs méthodes normalisées de mesure et de déclaration des émissions de HAP ; les données reportées ont été exprimées selon les groupes de HAP suivants : VDI groupe I (2), VDI groupe II (7), OSPAR_{II} (11), EPA (16). Les HAP à faible masse moléculaire sont très sensibles aux conditions et procédures d'échantillonnage et d'analyse. Les données exprimées selon la norme EPA présentent donc un certain degré d'incertitude lié au caractère potentiellement incomplet de l'échantillonnage effectué. Le tableau 12.10 représente les composés de HAP mesurés et déclarés à l'aide de ces méthodes standard.

Le tableau suivant propose les plages d'émissions de HAP associées à divers systèmes de dépollution et exprimés selon ces conventions.

Méthode de dépollution	BaP [µg/Nm ³]	VDI-I [µg/Nm ³]	VDI-I+II [µg/Nm ³]	OSPAR _{II} [µg/Nm ³]	EPA [µg/Nm ³]
CTO	0,03	0,04	3,35 *	64,6	75,6
CTO		< 1	10		260 - 330
RTO		< 1 - 4	10 - 50		
RTO		0,08 - 0,92	10 - 20		
Épurateur par voie humide		1 - 27			1670 - 2 980
Épurateur par voie sèche		1 - 12	14		
Épurateur par voie sèche		6,7 - 9,2	11 - 1 350		2 320 - 3 754
Épurateur par voie sèche	1,3	1,4	153 *	46 875	55 383
Épurateur par voie sèche	0,6 - 2,6	0,8 - 2,8	150 - 293 *	38 831 - 46 865	47 794 - 55 334
Électrofiltre	34	43,8	471	6 251	8 049
Électrofiltre	10,6 - 45,3	13,7 - 56,5	199 - 613		
Électrofiltre	1 - 8	1 - 8	200 - 800		2 650 - 6 300

Tableau 12.5 : Exemples de plages d'émissions de HAP déclarées selon différents groupes de composés

* VDI-I+II : sans benzo(b)naphol(2,1-d)thiophène.

12.2.2 Eaux usées

La production d'électrodes et des produits de graphite se compose, par essence, de procédés par voie sèche. Le rejet d'eaux usées se limite généralement à l'eau de refroidissement, quoique la plupart des procédés utilisent un système de refroidissement en circuit fermé. Les eaux de pluie ruisselant des surfaces et des toits peuvent contenir des poussières de carbone et autres matériaux associés. Les émissions venant des matériaux stockés à l'air libre et des dépôts de solides constituent une source de pollution potentielle. Les valeurs typiques, pour ce type de contamination, associées aux procédés appliqués dans la production d'aluminium primaire sont généralement < 0,03 kg/t pour les matières solides en suspension et < 0,02 kg/t pour les fluorures dissous [tm 100, NL Al 1998]. La solution actuelle consiste à utiliser des circuits en dépression pour le transfert des matériaux et des silos fermés pour le stockage. Cela permet ainsi de réduire la contamination des eaux de ruissellement.

D'importantes quantités d'eaux usées peuvent être rejetées lorsque l'on utilise des systèmes par voie humide pour réduire la pollution de l'air. Ces eaux usées générées par les systèmes de dépollution par voie humide sont considérées comme un effet croisé des techniques de dépollution. On utilise souvent des filtres électrostatiques par voie humide pour éliminer les hydrocarbures des gaz issus des fours ; ces filtres constituent, là encore, une source potentielle d'eaux usées contaminées. Selon le processus biologique sur lequel ils reposent, certains bio-filtres peuvent également être générateurs d'eaux usées.

Ces procédés sont à l'origine de la production d'eaux usées constituées par l'eau de refroidissement (utilisée pour le refroidissement des anodes crues) ou provenant du traitement des effluents gazeux. Le

refroidissement peut s'effectuer à l'aide de systèmes à circulation d'eau indirecte ; dans ce cas, l'eau de refroidissement rejetée est propre. Des systèmes de refroidissement indirect par circulation d'eau peuvent également être utilisés pour refroidir les effluents gazeux pour que ceux-ci puissent être épurés par des techniques de dépollution standard [tm 93, PARCOM 1993] (filtres à manche, filtres électrostatiques).

12.2.3 Résidus de traitement

La production de carbone et de graphite s'accompagne de la génération de plusieurs sous-produits, résidus et déchets, qui sont également énumérés dans le Catalogue européen des déchets (Décision du Conseil 94/3/CE). Les principaux résidus spécifiques aux procédés sont énumérés ci-dessous.

Les briques réfractaires des fours de cuisson peuvent être mises en décharge en tant que déchets, ou réutilisées dans d'autres applications après avoir subi un nettoyage. La durée de vie typique d'un garnissage de four à anodes précuites est d'environ 100 cycles, ce qui représente près de 10 kg de briques par tonne d'anodes produite.

Parmi les autres résidus figurent notamment les matériaux éliminés au cours des étapes de mise en forme, de découpe et de broyage, ainsi que des fractions de goudron ou de brai. En fonction de leur nature, ceux-ci peuvent être recyclés comme matières premières dans le procédé ou comme combustibles ou carburants dans d'autres applications. Dans certains cas, on produit volontairement des matériaux carbonisés ou graphitisés de façon à les broyer puis à les réutiliser comme matières premières, ce qui permet de contrôler les propriétés du produit.

Le substrat biologique usagé est également éliminé ; il présente toutefois un intérêt comme substance nutritive pour les sols, à condition que ses constituants toxiques soient préalablement décomposés.

12.3 Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD

Cette section présente un certain nombre de techniques de prévention ou de réduction des émissions et des résidus, ainsi que des moyens de réduire la consommation d'énergie dans son ensemble. Toutes ces techniques sont disponibles sur le marché. Elles sont illustrées par des exemples présentant de hautes performances environnementales. Les exemples de techniques présentés reposent sur les données fournies par les acteurs industriels, les États membres de l'UE et l'évaluation du Bureau européen de l'IPPC. Les techniques génériques décrites dans le Chapitre 2 intitulé « Procédés communs » sont, dans une large mesure, applicables aux procédés utilisés dans ce secteur et influencent la façon de contrôler et d'exploiter les procédés principaux et les procédés associés.

Les techniques spécifiques applicables à ce groupe de métaux sont présentées brièvement ci-dessous. Les procédés de manutention et de prétraitement des matières premières, ainsi que les systèmes de régulation des procédés et de dépollution revêtent une importance particulière, tout comme la régulation des paramètres de fonctionnement des fours et la prévention des émissions fugitives générées par les fours. Certaines techniques utilisées dans d'autres secteurs, notamment celles relatives aux systèmes d'élimination des hydrocarbures et des HAP, sont également applicables aux procédés de production d'électrodes en carbone et en graphite.

Pour chaque site de production, les techniques à prendre en compte dépendent largement des caractéristiques du produit ; cela influence sur l'utilisation de certaines matières premières et certains procédés. Les procédés de base décrits dans la section consacrée aux techniques appliquées constituent donc les techniques à prendre en compte en tant que procédés de production, dès lors qu'ils sont associés aux étapes de dépollution appropriées. Les techniques à prendre en compte concernant les opérations de collecte et de dépollution, ainsi que d'autres aspects de l'exploitation de la régulation des procédés, sont traités dans la section 2.

12.3.1 Techniques de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux

Les matières premières sont le carbone, le coke, le brai, les sciures, les produits de garnissage et les résines. Les aspects-clés sont la prévention des fuites de poussières et de matériaux humides, la collecte et le traitement des poussières et des liquides et la régulation des paramètres d'entrée et de fonctionnement des techniques de manutention et d'alimentation.

Les problèmes spécifiques à ce groupe sont :

- Du fait de la nature potentiellement pulvérulente de certaines matières premières, des systèmes de stockage, de manutention et de traitement fermés sont utilisés.
- Compte tenu des poussières générées par certaines opérations de concassage et de broyage, les dispositifs de collecte et de dépollution peuvent être applicables à ce type de procédés.
- Comme cela a été indiqué plus haut, le mode de stockage des matières premières dépend de leur nature. Le stockage des poussières fines s'effectue dans des bâtiments clos ou au moyen d'un conditionnement hermétique. Le brai liquide est stocké dans des citernes munies de condenseurs en vue d'éliminer les hydrocarbures au cours de la respiration et de la ventilation des gaz déplacés en direction du véhicule-citerne lors de la livraison.
- Les matériaux qui contiennent des constituants hydrosolubles sont stockés sous abri.
- Les matériaux non-pulvérulents et non-solubles sont stockés en tas à ciel ouvert et les éléments volumineux sont stockés individuellement à l'air libre.

Le tableau ci-après résume les techniques à prendre en compte pour les opérations de stockage, de manutention et de prétraitement des matériaux.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Commentaires
Carbone ou coke	Silos	Manutention pneumatique ; convoyeurs couverts (si matériaux pulvérulents)	Broyage ou meulage ; mélange	
Combustible, brai ; solvants ou résines	Citernes ou fûts en enceinte	Conduite sécurisée ou système manuel	Broyage ou meulage ; mélange, imprégnation	Collecte des huiles si nécessaire ; ventilation en retour des citernes ; récupération des solvants
Poussières fines de carbone et de graphite ; matériaux granulés	Bâtiment fermé	Manutention en enceinte fermée avec collecte des poussières ; manutention pneumatique	Broyage ou meulage ; mélange	
Gros grains de carbone et de graphite ; morceaux	Travées couvertes ou non	Chargeuse mécanique	Broyage ou meulage ; mélange	
Produits : Produits de forme Poudres	Stockage couvert ou à l'air libre Fûts ou sacs		Imprégnation	
Résidus de procédé à récupérer	Stockage couvert ou fermé (selon le risque de formation de poussières)	Dépend des conditions		Système de drainage approprié
Déchets à éliminer	Travées couvertes ou fermées, ou stockage hermétique (fûts), selon la nature du matériau	Dépend des conditions		Système de drainage approprié

Tableau 12.6 : Techniques à prendre en compte pour les méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement

12.3.2 Autres étapes de procédé

Les procédés utilisés dépendent dans une large mesure du produit et de ses spécifications. Il s'agit donc de facteurs spécifiques à chaque site. Les systèmes de mélange, de mise en forme, de cuisson (production d'anodes), d'imprégnation, de graphitisation, de mise en forme du produit, de collecte et de dépollution des fumées décrits dans la section consacrée aux techniques appliquées constituent donc les techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD. En substance, associées à une dépollution adaptée (voir Chapitre 2), les techniques de traitement présentées dans ce chapitre sont en mesure de satisfaire les exigences relatives à une protection stricte de l'environnement [tm 207, TGI 1999]. Voici les plus importantes techniques à prendre en compte :

- broyage et mélange des matières premières en enceinte fermée avec système d'extraction ; dépollution par filtres à manches ;
- utilisation de fours dotés de dispositifs performants d'extraction des effluents gazeux venant du procédé ; fonctionnement des fours planifié de façon à ce que les périodes alternées de refroidissement et de chauffage maximisent la récupération de la chaleur des gaz ;
- s'ils n'ont pas été éliminés par une autre technique de dépollution, destruction des cyanures, goudrons et hydrocarbures dans une unité de post-combustion ;
- utilisation de brûleurs bas NO_x ou d'une oxycombustion ; régulation du chauffage des fours afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie et de réduire les émissions de HAP et de NO_x ;
- maintenance appropriée des fours pour assurer l'étanchéité des conduits dans lesquels s'écoulent les effluents gazeux et l'air ;
- surveillance du système de collecte des gaz afin d'identifier d'éventuels colmatages et mélanges explosifs dus à la condensation des hydrocarbures ;
- au besoin, utilisation d'une épuration humide ou semi-sèche en vue d'éliminer le SO_2 ;
- utilisation de filtres à lit de coke ou d'épurateurs par voie sèche associés à des filtres à manches ;
- filtres électrostatiques permettant d'éliminer les goudrons, les hydrocarbures et les HAP générés lors des étapes de stockage du brai, de malaxage, d'imprégnation, de mise en forme et de cuisson ; utilisation d'unités de post-combustion permettant, au besoin, une réduction supplémentaire de la concentration de goudrons, d'hydrocarbures et de HAP ;
- si nécessaire, élimination des composés olfactifs (production de carbone spécial) à l'aide de bio-filtres ;
- systèmes de refroidissement hermétiques ou indirects.

Réactif utilisé	Composé dans les effluents gazeux	Méthode de traitement
Solvants, COV	COV	Condensation, charbon actif, bio-filtre
fréons, halogénures	Cl_2 , F_2 , HF, HCl	Collecte, système d'épuration à la soude caustique
Acide nitrique	NO_x	Oxydation et absorption, recyclage, épuration
Goudrons, brai	Hydrocarbures, HAP	Post-combustion, condensation, électrofiltre, filtre à charbon, épurateur à l'alumine
Soufre	SO_2	Système d'épuration par voie humide ou sèche
Polyacrylonitrile (PAN)	HCN	Post-combustion

Tableau 12.7 : Méthodes de traitement des composés gazeux

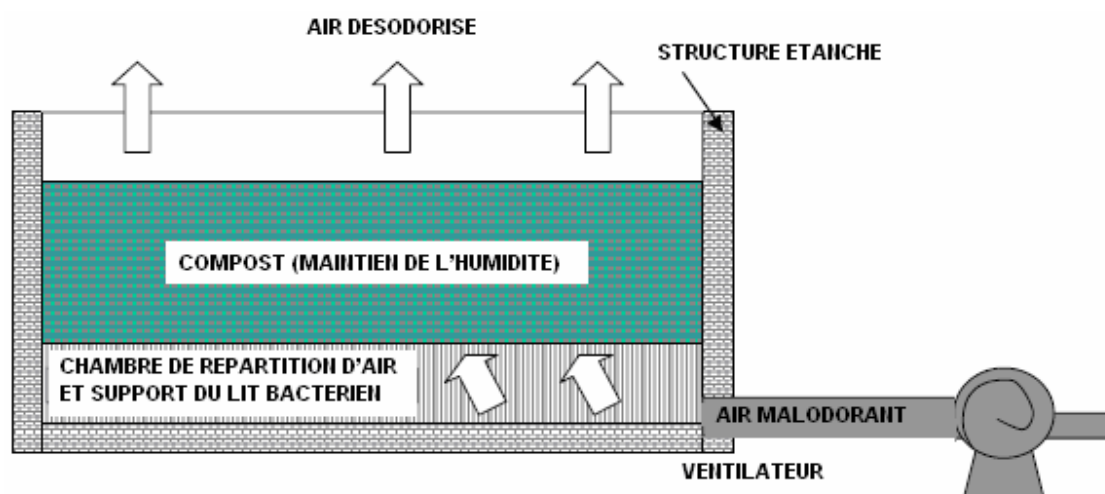


Figure 12.9 : Exemple de bio-filtre

EXEMPLE 12.01 **ADSORPTION PAR VOIE SECHE DES FLUORURES ET DES HAP**

Description : Les émissions générées par la production d'anodes crues et par la cuisson des anodes peuvent être réduites au moyen d'une adsorption par voie sèche associée à une élimination des poussières. La technique d'adsorption par voie sèche repose sur le principe selon lequel les polluants sont adsorbés à la surface d'un média filtrant constitué de particules. Les fluorures, les hydrocarbures et en particulier les HAP ont tendance à adhérer à ces particules. Celles-ci sont ensuite éliminées des effluents gazeux avec les polluants adsorbés au moyen de techniques classiques de dépollution des poussières (filtres à manches, par ex.).

Principaux bénéfices environnementaux : Élimination des hydrocarbures, des HAP et des poussières

Données opérationnelles : L'alumine sert souvent de média adsorbant dans les usines de production d'aluminium à unité de production d'anodes intégrée. On peut également de la poussière de coke ou de la chaux comme média adsorbant. Le matériau adsorbant est souvent éliminé des effluents gazeux à l'aide de filtres à manches. L'avantage de ces filtres est qu'une couche d'adsorption supplémentaire se forme à leur surface. L'utilisation de filtres à manches est limitée à la fois par le taux d'humidité et par les températures des flux de gaz. Les effluents gazeux sont donc souvent prétraités dans une tour de conditionnement. Le prétraitement peut également s'effectuer à l'aide de filtres électrostatiques afin d'éliminer les particules avant l'étape d'adsorption par voie sèche.

Le média adsorbant doit être éliminé régulièrement du système ; il est souvent réutilisé dans les procédés de production. L'alumine peut être re-utilisée à l'électrolyse, tandis que la poussière de coke est réutilisable dans la production d'anodes. Les HAP et les hydrocarbures condensables sont calcinés aux températures élevées appliquées pour ces procédés. Le SO_2 est lui aussi initialement éliminé par ce système, mais est de nouveau émis lorsque l'on réutilise le matériau adsorbant ; il sera finalement rejeté dans l'atmosphère.

Etant donné que la plupart des usines de production d'aluminium procèdent déjà à une réduction des émissions dues à l'électrolyse en associant une adsorption par voie sèche à l'alumine à une élimination des poussières, cette technique s'applique souvent aussi aux effluents gazeux générés par la production d'anodes. D'autres usines ont recours à des systèmes utilisant, comme média adsorbant, de la poussière de coke qui est ensuite réutilisée pour produire les anodes (unité de production d'anodes indépendante, par

ex.). Il faut noter que la combinaison adsorption voie sèche + élimination des poussières est souvent appliquée en combinaison avec d'autres techniques (condensation, adsorption par voie sèche et, dans certains cas, épuration par voie humide) en vue de réduire les émissions liées à la production d'anodes.

Effets croisés : Ils dépendent de la réutilisation de l'adsorbant dans le procédé. L'adsorption par voie sèche, associée à l'élimination des poussières, nécessite un supplément d'énergie. Aucune information n'a pu être obtenue concernant la consommation énergétique spécifique à cette technique de dépollution des émissions générées par la production d'anodes.

Aspects économiques : D'après les données communiquées par deux usines anonymes, les coûts d'exploitation de l'épuration par voie sèche vont de 2 à 5 ECU par tonne d'aluminium.

Applicabilité : Epurateurs à l'alumine – unités de production d'anodes ou de pâte associées aux fours de fusion de l'aluminium primaire – épurateurs au coke (si l'adsorbant à base de coke est réutilisable dans le procédé sous forme de poudre ou de grains)

Exploitations de référence : France, Allemagne

Documents de référence : [tm 100, NL Al 1998]

EXEMPLE 12.02 CONDENSATION ET FILTRES ELECTROSTATIQUES

Description : Les hydrocarbures volatils émis lors de la cuisson des anodes peuvent subir une condensation. Les particules d'hydrocarbures condensées sont éliminées des effluents gazeux. Cette technique permet également de réduire les émissions de HAP, puisque ceux-ci ont tendance à adhérer aux particules d'hydrocarbures. La condensation peut être réalisée par refroidissement externe et/ou interne à l'air et/ou à l'eau, et s'effectue souvent dans des tours de conditionnement.

Les particules d'hydrocarbures condensées peuvent être éliminées des effluents gazeux au moyen de techniques classiques de dépollution des poussières (filtres à manches ou filtres électrostatiques, par ex.).

Principaux bénéfices environnementaux : Elimination et récupération des hydrocarbures condensables.

Données opérationnelles : Données non disponibles

Effets croisés : Effet bénéfique : récupération des hydrocarbures qui seront réutilisés dans le procédé ; effet négatif : coût énergétique du refroidissement.

Aspects économiques : Données non disponibles ; mais plusieurs installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Prétraitement applicable dans le cadre de diverses techniques de dépollution

Exploitations de référence : Allemagne

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

EXEMPLE 12.03**UNITÉ DE POST-COMBUSTION AVEC RECUPÉRATION DE LA CHALEUR**

Description : Un certain nombre d'applications utilisent déjà une unité de post-combustion avec récupération de la chaleur. Ce procédé consiste en une série de cycles alternés des gaz dans différentes zones de support successives où ont lieu des cycles de chauffage, de refroidissement et d'épuration. La fraction combustible est chauffée dans la zone de chauffage et passe dans une chambre commune où s'achève la combustion. Les gaz chauds sont ensuite dirigés vers une section de refroidissement dont on élève ensuite la température afin de pouvoir l'utiliser comme prochaine zone de chauffage. Ces changements de zones s'effectuent via un système à manifold [jeu de raccordements et de vannes permettant diverses combinaisons ou divers branchements de tuyauterie] permettant de nettoyer les zones.

Principaux bénéfices environnementaux : Le contenu énergétique des polluants (hydrocarbures et HAP) sert à chauffer les matériaux de support, ce qui assure ainsi un fonctionnement auto-thermique.

Données opérationnelles : Données non disponibles ; toutefois des concentrations inférieures à 0,1 ng/Nm³ de dioxines ont été déclarées dans le cas d'une installation équipée d'un haut fourneau.

Effets croisés : fonctionnement thermiquement autogène

Aspects économiques : Données non disponibles ; mais plusieurs installations sont économiquement viables.

Applicabilité : Applicable à un large panel de procédés. Le principe de base est intéressant, mais le passage à la phase de nettoyage est susceptible d'entraîner une émission de matières imbrûlées si le système est mal conçu. Cette technique est considérée comme émergente pour les hydrocarbures condensables de haute masse moléculaire.

Exploitations de référence : Allemagne, RU

Documents de référence : [tm 106, Farrell 1998]

12.3.3 Eaux usées

Les eaux usées constituent un aspect spécifique à chaque site, la recirculation des eaux est largement pratiquée. D'après les informations collectées, les systèmes de traitement existants sont très performants. L'intégralité du volume d'eaux usées doit être traitée pour éliminer les hydrocarbures et les matières solides. Les techniques énumérées dans le Chapitre 2 sont les techniques à prendre en compte pour le traitement des eaux usées. Dans certaines installations, l'eau de refroidissement et les eaux usées traitées (y compris les eaux de pluie) sont réutilisées ou recyclées dans les procédés.

12.3.4 Résidus de traitement

Les principes de minimisation du volume de déchets et de réutilisation des résidus de traitement constituent une partie des MTD.

12.4 Meilleures techniques disponibles

Pour mieux comprendre l'objet et le contenu de cette section, le lecteur prêter une attention particulière à la préface du présent document, notamment à la cinquième section de la préface, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques et niveaux (ou plages de niveaux) d'émissions et/ou de consommations associés présentés dans cette section ont été évalués selon une démarche itérative comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux aspects environnementaux propres au secteur, à savoir, dans le contexte de la production du carbone et du graphite : HAP, hydrocarbures, poussières, fumées, odeurs, SO₂, prévention de la génération d'eaux usées, résidus tels que les poussières sous filtre ;
- analyse des techniques les plus à même de traiter ces aspects-clés ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementaux en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le reste du monde ;
- analyse des conditions dans lesquelles ces niveaux de performances ont été atteints (coûts, effets croisés, principaux enjeux à l'origine de la mise en œuvre de ces techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émissions et/ou de consommations associés pour ce secteur, au sens général de l'Article 2(11) et de l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement expert du Bureau européen de l'IPPC et du Groupe de travail technique (GTT) formé pour traiter ces questions a joué un rôle essentiel lors de chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont ici présentées.

D'après cette évaluation, ce chapitre présente les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommations associés à la mise en application des MTD ; celles-ci sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble et reflètent souvent les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émissions et de consommations « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre suite à l'application, dans ce secteur, des techniques décrites, sans perdre de vue l'équilibre coûts/bénéfices inhérent à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne constituent en aucun cas des valeurs-limites d'émissions ni de consommations ; ils ne doivent donc pas être interprétés comme tels. Dans certains cas, il peut être techniquement possible de parvenir à de meilleurs niveaux d'émissions et de consommations mais, du fait des coûts ou des effets croisés qu'elles induisent, les techniques alors appliquées ne sont pas considérées comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois trouver leur justification dans certains cas spécifiques caractérisés par des enjeux particuliers.

Les niveaux d'émissions et de consommations associés à l'utilisation des MTD doivent être considérés selon les conditions de référence spécifiées (périodes prises en compte pour établir les moyennes, par ex.).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau atteignable » utilisé dans une autre section du présent document. Lorsqu'un niveau est dit « atteignable » au moyen d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, cela signifie que l'on peut s'attendre à ce que ce niveau soit atteint à long terme dans une installation entretenue et exploitée de façon adéquate ou par un procédé reposant sur ces techniques.

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts sont présentées avec la description des techniques abordées dans la section précédente. Ces données fournissent une estimation approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois le coût réel de mise en œuvre d'une technique dépend largement de

la situation spécifique, par exemple de la fiscalité, des tarifs et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Le présent document n'est pas en mesure d'évaluer pleinement ce type de facteurs spécifiques à un site donné. En l'absence de données concernant les coûts, les observations effectuées sur les installations existantes permettent de formuler des conclusions sur la viabilité économique des différentes techniques.

Les MTD générales sont censées constituer un point de référence permettant d'apprécier les performances actuelles d'une installation existante ou d'évaluer un projet concernant une installation nouvelle. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions de fonctionnement « fondées sur les MTD » adéquates pour l'installation ou la définition de règles générales de nature contraignante conformément à l'Article 9(8). On peut anticiper le fait que les installations nouvelles peuvent être conçues de façon à atteindre, voire dépasser, les niveaux associés aux MTD générales présentées ici. On considère également que les installations existantes peuvent évoluer vers les niveaux associés aux MTD générales, voire plus loin, dès lors que ces techniques sont applicables, dans chaque cas, sur les plans technique et économique.

Bien que les BREF n'aient pas pour fonction de d'établir des normes contraignantes, ils sont censés fournir des informations aux industriels, aux États membres et au public concernant les niveaux d'émissions et de consommations atteignables à l'aide des techniques spécifiées. Les valeurs-limites adaptées à tout cas spécifique devront être déterminées en prenant en compte les objectifs de la Directive IPPC et les considérations locales.

Les Meilleures Techniques Disponibles varient en fonction d'un certain nombre de facteurs ; il est donc nécessaire de définir une méthode d'analyse applicable à ces techniques. L'approche retenue est présentée ci-dessous.

Le choix du procédé dépend tout d'abord largement des produits fabriqués, notamment de leur volume et des additifs nécessaires.

Le procédé doit en outre être utilisable avec les meilleurs systèmes de collecte et de dépollution des gaz disponibles. Les techniques de collecte et de dépollution des fumées utilisées dépendent des caractéristiques des procédés principaux ; par exemple, certains procédés sont plus faciles à effectuer de façon hermétique.

Il faut enfin tenir compte des problèmes liés à l'eau et aux déchets, notamment la limitation du volume de déchets et la possibilité de réutiliser les résidus et les eaux usées au sein du procédé ou dans d'autres procédés. La demande énergétique est également un facteur à considérer lors du choix du procédé.

Le choix des MTD au sens large est donc complexe et dépend des facteurs mentionnés ci-dessus. Les exigences variables signifient que les MTD sont influencées principalement par les caractéristiques des produits que l'on cherche à obtenir.

Les points suivants résument la méthodologie préférentielle utilisée lors de ce travail :

- Le procédé est-il attesté et fiable au niveau industriel ?
- Existe-t-il des restrictions concernant les matières chargées qui peuvent être traitées par le procédé ?
- La nature de la charge et des autres matériaux qu'elle contient a une incidence sur le choix du procédé de production de produits particuliers.
- Existe-t-il des restrictions concernant la capacité de production (limite supérieure établie ou capacité minimale requise pour que l'installation soit économiquement viable) ?
- Le procédé est-il compatible avec les techniques les plus récentes et les plus efficaces en matière de collecte et de dépollution ?
- L'association du procédé et des techniques de dépollution permet-elle d'atteindre les niveaux d'émissions les plus bas possible ? Les niveaux d'émissions atteignables sont présentés plus loin.

- Y a-t-il d'autres aspects à prendre en compte (sécurité, par ex.) ?

A l'heure de la rédaction du présent document, il existe plusieurs combinaisons de procédés et de techniques de dépollution capables de satisfaire aux normes environnementales les plus élevées et aux exigences des MTD. Ces procédés varient en termes de matériaux utilisables, mais aussi de capacité de production et de produits réalisables ; les étapes de procédé présentées comme techniques à prendre en compte constituent donc la base des MTD. Les techniques de collecte et de dépollution qu'utilisent ces procédés ont été présentées sous le titre « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » ; associées aux procédés métallurgiques, elles assurent un niveau élevé de protection environnementale.

Tel qu'indiqué dans la préface générale de ce document, la présente section propose des techniques et des niveaux d'émissions considérés comme compatibles avec les MTD en général. L'objectif est de fournir des indications générales concernant les niveaux d'émissions et de consommations qui pourraient servir de référence appropriée pour l'évaluation des performances réalisables fondées sur les MTD. Ceci est réalisé en indiquant des niveaux atteignables sous forme de plages de valeurs qui sont généralement applicables aux unités nouvelles comme aux unités modifiées. Les installations existantes peuvent présenter des facteurs restrictifs, tels que l'espace ou la hauteur maximale, qui entravent la mise en œuvre totale de ces techniques.

Les niveaux varient également sur la durée, en fonction de l'état des équipements, de leur maintenance et de la régulation des procédés au sein de l'unité de dépollution. Le fonctionnement du procédé-source a également une incidence sur les performances du fait de la probabilité des variations de température, du volume de gaz ou même des caractéristiques du matériau entre le début et la fin d'un processus ou d'un lot. Les émissions atteignables ne constituent donc qu'une base à partir de laquelle les performances réelles de l'unité de production peuvent être jugées. La dynamique du procédé ainsi que d'autres aspects spécifiques à un site donné doivent être pris en compte au niveau local. Les exemples proposés dans la section intitulée « Techniques à prendre en compte lors de la détermination des MTD » présentent les concentrations associées à certains procédés existants.

12.4.1 Manutention et stockage des matériaux

Les conclusions relatives aux meilleures techniques disponibles en termes de stockage et de manutention des matériaux figurant dans la section 2.17 de ce document sont applicables aux matériaux du présent chapitre. Le tableau ci-après résume les méthodes considérées comme MTD.

Matériau	Stockage	Manutention	Prétraitement	Remarque
Carbone ou coke	Silos	Manutention pneumatique ; convoyeurs couverts (si matériaux pulvérulents)	Broyage ou meulage ; mélange	
Combustible, brai ; solvants ou résines	Citernes ou fûts en enceinte	Conduite sécurisée ou système manuel	Broyage ou meulage ; mélange, imprégnation	Collecte des huiles si nécessaire ; ventilation en retour des réservoirs ; récupération des solvants
Poussières fines de carbone et de graphite ; matériaux granulés	Bâtiment fermé	Manutention en enceinte fermée avec collecte des poussières ; manutention pneumatique	Broyage ou meulage ; mélange	
Gros grains de carbone et de graphite ; morceaux	Travées couvertes ou non	Chargeuse mécanique	Broyage ou meulage ; mélange	
Produits : Profilés	Stockage couvert ou à l'air libre		Imprégnation	
Poudres	Fûts ou sacs			
Résidus de procédé à récupérer	Stockage couvert ou fermé (selon le risque de formation de poussières)	Dépend des conditions		Système de drainage approprié
Déchets à éliminer	Travées couvertes ou fermées, ou stockage hermétique (fûts), selon la nature du matériau	Dépend des conditions		Système de drainage approprié

Tableau 12.8 : Méthodes de stockage, de manutention et de prétraitement considérées comme MTD

12.4.2 Sélection du procédé

Il est impossible de conclure que seul un procédé de production est applicable à ce groupe. Le choix du procédé dépend dans une large mesure des propriétés physiques et chimiques que l'on souhaite obtenir dans le produit fini. Associées à des systèmes de dépollution conçus et utilisés de façon adéquate, les techniques présentées ci-dessus permettent de réaliser des performances environnementales similaires.

12.4.3 Collecte et dépollution des gaz

Les systèmes de collecte des fumées utilisés devraient tirer parti de dispositifs de mise en étanchéité des fours ou des réacteurs et être conçus de façon à y maintenir une dépression appropriée afin d'éviter les fuites et les émissions fugitives. Les systèmes assurant l'étanchéité des fours ou le déploiement de hottes sont considérés comme MTD. A titre d'exemple, citons notamment la mise en place de valves rotatives solides sur les dispositifs d'alimentation. Coûteuse et grande consommatrice d'énergie, la collecte

secondaire des fumées est toutefois nécessaire en présence de certains types de fours. Le système utilisé doit être intelligent et capable de cibler l'extraction des fumées selon la source et la durée des émissions de fumées.

Les meilleures techniques disponibles concernant les dispositifs de traitement des gaz et des fumées sont celles qui assurent un refroidissement et une récupération de la chaleur avant le passage dans un filtre à manches, si la configuration le permet. Il est possible d'utiliser des filtres à manches constitués de matériaux modernes à haute performance associés à une structure bien conçue et convenablement entretenue. Ces filtres comportent des systèmes de détection de rupture de manche et des méthodes de décolmatage en ligne.

Le traitement des gaz émis lors des procédés de production utilisant des additifs à base de soufre doit comporter une étape d'élimination du dioxyde de soufre, tandis que ce traitement doit, dans le cas des procédés à l'origine d'émissions d'hydrocarbures ou de HAP (fours pit, fours tunnels ou fours à chambre simple, par ex.), comprendre une post-combustion ou une épuration par voie sèche.

Les systèmes de récupération des gaz acides et des solvants mis en œuvre dans le cas de la production de carbone et de graphite spéciaux, et les étapes de récupération des poussières associées, sont ceux qui ont été présentés dans le Chapitre 2 de ce document. Les systèmes de collecte des fumées doivent se conformer aux meilleures pratiques présentées relativement aux techniques de la section 2.6. L'utilisation ou le recyclage des poussières sous filtre est considéré(e) comme partie intégrante de ces procédés.

D'autres systèmes de dépollution sont considérés comme applicables pour d'autres parties du procédé et le tableau ci-après donne un aperçu.

Source	Option de dépollution	Composés dans les effluents gazeux
Manutention et stockage des matériaux	Prévention, refroidisseur, unité de post-combustion, ventilation en retour des réservoirs	Poussières, hydrocarbures et HAP (concentrations potentiellement élevées)
Broyage	Cyclone et filtre à manches	Poussières Manutention des matériaux séchés
Homogénéisation et mise en forme	Unité de post-combustion. Filtre à coke	Poussières, hydrocarbures et HAP Manutention des matériaux séchés
Cuisson des anodes	Unité de post-combustion. Refroidisseur, adsorption sur chaux/charbon et filtre à manches. Epurateur à l'alumine et filtre à manches (si procédé intégré au four de fusion de l'Al primaire)	Poussières, SO ₂ , hydrocarbures et HAP On peut utiliser un électrofiltre pour éliminer les matières condensables.
Cuisson ou re-cuisson d'autres électrodes	Refroidisseur et filtre imprégné. Unité de post-combustion (et filtre à manches)	Poussières, SO ₂ , hydrocarbures et HAP On peut utiliser un électrofiltre pour éliminer les matières condensables. En fonction de la collecte des gaz venant des fours
Lavage et séchage	Collecte des gaz et bio-filtre	Odeurs, solvants organiques
Imprégnation	Unité de post-combustion. Collecte des gaz et filtre (filtre à charbon ou bio-filtre pour les solvants)	Hydrocarbures et HAP, odeurs, solvants organiques et fumées de métaux
Graphitisation	Collecte des gaz et filtre à manches (épurateur de SO ₂ si nécessaire)	Poussières, SO ₂ En fonction de la collecte des gaz des fours.
Usinage et mise en forme du produit	Cyclone et filtre à manches	Poussières – les poussières et les particules collectées sont réutilisées comme matières premières.
Note – Les filtres électrostatiques modernes et bien conçus peuvent présenter des performances identiques à celles des épurateurs par voie sèche.		

Tableau 12.9 : Sources et traitement des émissions réduites et fugitives générées par la production de carbone et de graphite

12.4.3.1 Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD

Les émissions dans l'air comprennent les émissions captées / réduites provenant des différentes sources, auxquelles s'ajoutent les émissions fugitives ou non-captées provenant de ces mêmes sources. Utilisés convenablement, les systèmes modernes permettent une élimination efficace des polluants. Les informations disponibles au moment de la rédaction du présent document indiquent que les émissions fugitives peuvent constituer la principale source d'émissions totales.

Pour l'ensemble des procédés, les émissions totales dans l'air comprennent celles provenant :

- de la manutention et du stockage des matériaux ;
- des étapes de mélange et d'homogénéisation ;
- des étapes de cuisson, d'imprégnation, de graphitisation et de finition.

Les émissions fugitives peuvent être extrêmement importantes ; il est possible d'établir des prévisions en s'appuyant sur le rendement de captage des gaz et en effectuant une surveillance de l'environnement (voir le Chapitre 2.6).

Les valeurs relatives aux HAP présentent un certain degré d'incertitude. Il existe plusieurs méthodes normalisées de mesure et de déclaration des émissions de HAP ; les données reportées ont été exprimées selon les groupes de HAP suivants : VDI groupe I (2), VDI groupe II (7), VDI groupe I+II (9) OSPAR II (11), EPA (16).

Les HAP à faible masse moléculaire sont très sensibles aux conditions et procédures d'échantillonnage et d'analyse. Les données exprimées selon la norme EPA présentent donc un certain degré d'incertitude lié au caractère potentiellement incomplet de l'échantillonnage effectué. Toutefois, les techniques de dépollution conçues pour éliminer les HAP doivent normalement présenter des rendements d'élimination comparables pour chacune des conventions de déclaration, bien que les valeurs chiffrées soient différentes pour chacune de ces conventions.

Le tableau ci-dessous représente les composés de HAP mesurés et déclarés selon ces conventions.

Composés de HAP	VDI-I	VDI-II	VDI-I+II	OSPAR II	EPA
Naphtalène					X
Acénaphthylène					X
Acénaphthène					X
Fluorène					X
Phénanthrène				X	X
Anthracène				X	X
Fluoranthène				X	X
Pyrène					X
Benzo(a)pyrène	X		X	X	X
Dibenzo(a,h)anthracène	X		X	X	X
Benzo(a)anthracène		X	X	X	X
Benzo(b)fluoranthène		X	X	X	X
Benzo(j)fluoranthène		X	X		
Benzo(k)fluoranthène		X	X	X	X
Chrysène		X	X	X	X
Indéno(1,2,3-cd)pyrène		X	X	X	X
Benzo(ghi)pérylène				X	X
Benzo(b) naphtho (2,1-d) thiophène		X	X		

Tableau 12.10 : Conventions de déclaration des émissions de HAP

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 -5 mg/Nm ³	Cyclone et/ou filtre à manche	En fonction des caractéristiques des poussières
	< 30 mg/ Nm ³	Unités de filtration indépendantes utilisées pour les silos de stockage uniquement	
Hydrocarbures (volatils)	< 10 mgC/ Nm ³	Condenseur, adsorbeur. Ventilation en retour des gaz lors de la livraison.	
Hydrocarbures (condensables)	< 50 mgC/ Nm ³		
Note – Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage. La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.			

Tableau 12.11 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors du stockage et de la manutention du coke et du brai

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 -5 mg/ Nm ³	Cyclone + filtre à manches	En fonction des caractéristiques des poussières
HAP (VDI _I)	< 10 µg/ Nm ³	Unité de post-combustion (CTO/RTO)*	
HAP (VDI _{I+II})	< 100 µg/Nm ³	Unité de post-combustion (CTO/RTO)* Adsorbeur / épurateur par voie sèche	
Hydrocarbures (totaux)	< 5 mgC/ Nm ³ < 25 mgC/ Nm ³	Unité de post-combustion* Adsorbeur / épurateur par voie sèche	
SO ₂	< 50 – 200 mg/ Nm ³	Épurateur alcalin par voie humide ou semi-sèche	Si du soufre est ajouté au mélange ou si le combustible présente une teneur élevée en S
<p>Note – Émissions collectées uniquement.</p> <p>Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.</p> <p>La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.</p> <p>* Un certain nombre d'applications utilisent déjà une unité de post-combustion avec récupération de la chaleur. Celle-ci consomme moins d'énergie et peut émettre un volume de gaz moindre ; toutefois ce procédé est encore en développement.</p> <p>La mesure et la déclaration des HAP sont des tâches complexes ; la valeur déclarée dépend du nombre de HAP particuliers mesurés et déclarés.</p>			

Tableau 12.12 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors des étapes de broyage et d'homogénéisation

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1- 5 mg/ Nm ³	Filtre à manches	En fonction des caractéristiques des poussières
HAP (OSPAR ₁₁)	< 200 µg/ Nm ³	* Refroidisseur, adsorption sur chaux/charbon et filtre à manches	
HAP (EPA)	200 – 500 µg/ Nm ³	Unité de post-combustion	
Hydrocarbures (volatils)	< 10 -25 mgC/ Nm ³ < 10 -50 mgC/ Nm ³	Unité de post-combustion * Refroidisseur, adsorption sur chaux/charbon et filtre à manches	
Hydrocarbures (condensables)	< 1 – 5 mgC/ Nm ³	Unité de post-combustion ou * refroidisseur, adsorption sur chaux/charbon et filtre à manches	

Note – Emissions collectées uniquement.
 Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.
 La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.
 Il est possible d'utiliser un électrofiltre pour certaines applications utilisant des produits spéciaux et/ou de faibles charges spécifiques. Les niveaux d'émissions devraient, dans ce cas, être équivalents à ceux réalisés au moyen des techniques d'épuration par voie sèche.
 La mesure et la déclaration des HAP sont des tâches complexes ; la valeur déclarée dépend du nombre de HAP individuels mesurés et déclarés, et la proportion des différents HAP individuels varie.
 * Les filtres électrostatiques modernes et bien conçus peuvent présenter des performances identiques à celles des épurateurs par voie sèche.

Tableau 12.13 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors de la production d'anodes précurtées (s'il n'est pas possible de partager le système de dépollution avec les effluents gazeux venant de la fusion) et lors de la cuisson, de l'imprégnation et du recuit nécessaires à la production d'anodes en carbone et en graphite

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/ Nm ³	Épurateur à l'alumine et filtre à manches	En fonction des caractéristiques des poussières
BaP *	< 0,5 µg/ Nm ³	Épurateur à l'alumine et filtre à manches	Le BaP est un indicateur.
HAP (OSPAR ₁₁)	< 200 µg/ Nm ³	Épurateur à l'alumine et filtre à manches	
Hydrocarbures (totaux)	< 1 – 10 mgC/ Nm ³	Épurateur à l'alumine et filtre à manches	
HF	< 0,2 mg/ Nm ³	Épurateur à l'alumine et filtre à manches	
Fluorures totaux	< 0,5 mg/ Nm ³		

Note –Émissions collectées uniquement. Les niveaux d'émissions présentés ici concernent les gaz combinés provenant des cellules électrolytiques et de l'unité de production d'anodes après traitement dans un épurateur à l'alumine ou un filtre à manches.
 Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage.
 La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.
 * La mesure et la déclaration des HAP sont des tâches complexes ; la valeur déclarée dépend du nombre de HAP individuels mesurés et déclarés ; le BaP n'est utilisé que comme indicateur ; la proportion des différents HAP individuels varie.

Tableau 12.14 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors de la production d'anodes précuites obtenues par un procédé partageant un système de dépollution avec un four de fusion de l'aluminium primaire

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
Poussières	1 – 5 mg/ Nm ³	Cyclone + filtre à manches	En fonction des caractéristiques des poussières
Hydrocarbures (totaux)	< 10 mgC/ Nm ³	Filtre à manches	Utilisable avec un matériau cru uniquement
Note – Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage. La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.			

Tableau 12.15 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors des étapes d'usinage et de graphitisation

Polluant	Plage d'émissions associée à l'utilisation des MTD	Techniques permettant d'atteindre ces niveaux d'émissions	Commentaires
COV ou solvants exprimés en C	< 20 mg/ Nm ³	Confinement, condenseur, filtre à charbon ou bio-filtre	
Cyanure	< 2 – 5 mg/ Nm ³	Unité de post-combustion	Uniquement pour la production de fibres de carbone utilisant du PAN
Note – Émissions collectées uniquement. Les émissions associées sont données en tant que moyennes journalières établies d'après une surveillance effectuée en continu sur la période de fonctionnement. Lorsqu'il est impossible d'effectuer une surveillance continue, la valeur proposée est la moyenne établie sur la période d'échantillonnage. La conception du système de dépollution utilisé et la détermination de la température de fonctionnement s'effectuent en tenant compte des caractéristiques des gaz et des poussières.			

Tableau 12.16 : Émissions dans l'air associées à l'utilisation des MTD lors des étapes de malaxage et d'imprégnation en cas d'utilisation de solvants et dans le cadre de la production de fibres de carbone

12.4.4 Émissions dans l'eau

Les procédés décrits ci-dessus peuvent être réalisés en circuit fermé, ce qui est considéré comme MTD. Aucune émission dans l'eau n'est attendue dans le cas d'une installation nouvelle. Les boues provenant des circuits étanches et l'eau de purge sont des déchets qui feront l'objet d'une élimination spéciale.

12.4.5 Résidus de procédé

Les résidus des procédés de production peuvent être réutilisés dans le procédé ou dans d'autres applications.

12.4.6 Coûts associés aux MTD

Les données relatives aux coûts ont été compilées pour un panel de procédés et de systèmes de dépollution diversifié. Ces chiffres sont très spécifiques à chaque site et dépendent d'un certain nombre de facteurs. Les fourchettes de valeurs proposées peuvent toutefois permettre d'établir des comparaisons. Les données sont présentées en annexe à ce document de façon à ce que les coûts relatifs aux divers procédés et systèmes de dépollution appliqués à l'ensemble des métaux non-ferreux puissent être comparés.

12.5 Technologies émergentes

Un certain nombre d'applications utilisent déjà une unité de post-combustion avec récupération de la chaleur ; à niveau de performance équivalent, ce procédé consomme moins d'énergie. Il consiste en une série de cycles alternés des gaz dans différentes zones de séjour successives où ont lieu des cycles de chauffage, de refroidissement et d'épuration. D'après les informations collectées, le principe de base de la post-combustion avec récupération de chaleur est intéressant, mais le procédé est encore en développement car l'étape d'épuration nécessite quelques améliorations. A l'heure de l'achèvement du présent document, il est possible que la post-combustion avec récupération de la chaleur ait trouvé des applications dans d'autres procédés.

13 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

13.1 Déroulement des travaux

Les travaux de préparation du présent BREF ont débuté en décembre 1997 avec l'élaboration des documents de référence définissant la portée des travaux et les principaux aspects environnementaux à traiter.

La première réunion du Groupe de travail technique (GTT) s'est déroulée sur quatre jours, du 20 au 23 janvier 1998. Regroupant les acteurs de la production primaire et de la production secondaire des métaux non-ferreux, elle représentait la structure réelle du secteur. La portée et les aspects majeurs du présent document ont alors été définis. Les 42 métaux concernés ont été répartis en 10 groupes de métaux dont les procédés de production étaient identiques ou très proches.

Un premier projet du rapport a été proposé en octobre 1998 et soumis à l'approbation des membres du Groupe de travail technique. De nouvelles données et de nouveaux rapports ont alors été fournis.

Un second projet du document complet a été proposé en juillet 1999 et les commentaires formulés lors de cette nouvelle session de consultations ont permis de recueillir des données et des rapports supplémentaires.

La réunion finale du Groupe de travail technique s'est tenue du 24 au 26 novembre 1999 et a donné lieu à un haut niveau de consensus. Certains aspects, tels que les niveaux d'émissions de SO₂, de dioxines et de COV associés à la mise en œuvre des MTD, ont fait l'objet de discussions animées.

Les informations supplémentaires obtenues durant la consultation et suite à la réunion du Groupe de travail technique ont été intégrées dans la version définitive du BREF.

Le présent BREF a reçu un large soutien de la part du Groupe de travail technique et des participants à la 7^{ème} réunion du Forum d'échange d'informations. Les critiques ont principalement porté sur les informations manquantes et certains aspects liés à la présentation des informations (volonté d'inclure dans le résumé davantage de niveaux d'émissions et de consommations associés aux MTD).

Les principales conclusions relatives aux MTD applicables aux différentes étapes de production et aux différents procédés métallurgiques sont présentées dans la section consacrée aux meilleures techniques disponibles figurant dans chacun des chapitres 2 à 12.

13.2 Sources d'information

Les 42 métaux (plus les ferro-alliages, le carbone et le graphite) ont été classés en 10 groupes, 7 de ces groupes ont été pilotés par des experts de l'industrie. Des représentants des États membres ont pris part aux réunions de ces groupes d'experts, ce qui a permis de recueillir des données et des rapports fort intéressants. Les experts qui ont participé aux travaux sont reconnus dans le monde entier parmi ceux ayant le plus de connaissances et d'expérience. Les groupes d'experts représentant les groupes Cu, Al, Zn/Pb, métaux précieux, Ni/Co et ferro-alliages ont présenté des rapports de grande qualité sur leur sous-secteur.

Des rapports majeurs de grande qualité consacrés à certains secteurs spécifiques dans les États membres ont été présentés par l'Allemagne (Cu et Zn/Pb), la Finlande (Cu, Ni, ferro-alliages et Zn primaire), les Pays-Bas (Al primaire et Zn primaire), l'Autriche (Cu et Al secondaires) et l'Espagne (tous les secteurs).

Des rapports existants, rédigés pour le compte de la Commission européenne, du Royaume-Uni, du PNUE, de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe, de la PARCOM, de l'OSPARCOM, de l'USEPA et de la Norvège, ont été utilisés parallèlement à une série de publications de référence citées dans la bibliographie.

Les données concernant la description des procédés, les niveaux d'émission atteignables, l'efficacité des techniques et les facteurs relatifs à la supervision, la gestion et les réglementations ont été compilées suite à 60 visites de sites et 21 réunions des Groupes d'experts.

Le recoupement de ces sources a permis un examen rigoureux des données et des informations disponibles. Les rapports étaient tous d'une très grande qualité et les données fournies se sont avérées fiables et précises.

Comme cela a été mentionné précédemment, des données et des informations supplémentaires ont été présentées lors des phases de consultation liées au premier et au second projet de document. En outre, des informations complémentaires ont été fournies après la deuxième réunion du Groupe de travail technique afin d'étayer une méthode révisée de déclaration des niveaux d'émission associés à la mise en œuvre des MTD.

13.3 Recommandations pour les travaux à venir

Comme cela a été indiqué précédemment, les rapports provenant des différentes sources étaient d'une grande qualité, mais certaines lacunes ont été identifiées dans les données communiquées. Un complément d'information devra être fourni dans certains domaines afin de définir plus précisément les niveaux d'émissions associés aux MTD ou de faciliter la prochaine révision du présent document. Les points suivants devront être précisés :

- Le meilleur système de réduction et le niveau associé d'émissions dans l'atmosphère pour les gaz contenant des brouillards de mercure restent à déterminer. Des recherches sont en cours et des informations complémentaires pourraient être disponibles à l'automne 2000. Un rapport préliminaire est nécessaire pour que ces données puissent être incluses dans la prochaine révision du document ;
- L'utilisation d'unités de post-combustion pour éliminer le carbone total (COV) est une technique bien établie dans le secteur. Parmi les avancées les plus récentes figure la postcombustion avec récupération de la chaleur appliquée à un gaz épuré. Ce dispositif utilise le contenu énergétique des effluents gazeux finaux et réduit ainsi la consommation de combustible supplémentaire nécessaire pour porter le gaz à la chaleur de réaction voulue. De très bons résultats ont été démontrés sur une installation de production de cuivre secondaire, mais les résultats signalés dans d'autres secteurs sont variables. Il semble que les données relatives aux autres secteurs concernent des versions anciennes de la technique. Les données caractérisant des dispositifs de post-combustion plus développés seront disponibles au printemps 2001. Il faudrait que ces données soient communiquées et incluses dans la prochaine révision du document ;
- La plage de performances des autres systèmes de post-combustion doit être communiquée en vue de la prochaine révision du présent document afin de pouvoir confirmer les émissions associées à l'utilisation des chambres de post-combustion ou des systèmes de combustion optimisés. Les données existantes sont très limitées et celles provenant d'autres secteurs ont été utilisées pour élargir le panel d'informations de référence du présent document ;
- Il a été établi que les émissions fugitives pouvaient constituer la majeure partie des émissions dans l'atmosphère liées au secteur des métaux non-ferreux. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour mesurer et communiquer au sujet des émissions fugitives provenant des installations ainsi que des niveaux de réductions obtenus à l'aide des méthodes de collecte des fumées présentées dans ce document. Ces données doivent être disponibles pour la prochaine révision du document ;
- Des données supplémentaires devront être fournies avant la prochaine révision du document afin de confirmer les performances techniques des épurateurs alcalins par voie humide et semi-sèche utilisés pour l'élimination du SO₂. Les données actuelles sont très limitées et celles provenant des autres secteurs ont servi à élargir le panel d'informations de référence du présent document ;
- Des techniques émergentes ont été signalées pour la plupart des groupes de métaux, et la prochaine révision du document devra s'intéresser aux avancées nouvelles. En particulier, la technique consistant à utiliser des anodes inertes pour l'élaboration d'aluminium primaire semble lente à émerger ; opérationnelle, elle pourrait toutefois présenter plusieurs avantages majeurs sur le plan environnemental ;
- En vue de la prochaine révision du document, il faudra disposer de données concernant les émissions dans l'air, les émissions dans le milieu aquatique et les résidus des procédés. La collecte des informations doit débuter le plus tôt possible, et devrait prendre en compte les volumes spécifiques de gaz ou d'eaux usées rejeté(e)s (volume par tonne de produit fabriqué), de manière à pouvoir calculer des émissions spécifiques aux différent(e)s procédés et étapes relevant des MTD. Les niveaux de consommation énergétique doivent également être déclarés en s'appuyant sur ces données. Les

chiffres relatifs aux émissions spécifiques permettront d'établir des comparaisons entre les différentes installations d'un Etat membre à l'autre ;

- Des effets croisés ont été recensés dans de nombreux cas, mais les informations fournies pour ce document peuvent ne pas être exhaustives. Dans la mesure du possible, la prochaine révision du document doit être étayée par des commentaires concernant les effets croisés liés aux différents procédés ;
- La mesure des HAP se base sur un certain nombre de paramètres tels que BaP, HAP totaux, VDI, et OSPAR 11 pour l'air, ou encore Borneff 6 pour le milieu aquatique. Dans certains cas, la base des valeurs déclarées n'a pas été communiquée ; les données utilisées pour la prochaine révision du document devront comprendre des informations sur les composés mesurés. Le protocole applicable à la mesure et la déclaration des HAP est actuellement analysé par un groupe OSPARCOM dirigé par la Norvège ;
- Les équipements de régulation de certains fours et procédés (hauts fourneaux, notamment) peuvent être améliorés. Il est recommandé d'effectuer ces optimisations et de communiquer les données ainsi obtenues lors la prochaine révision de ce document ;
- Une partie des chiffres et informations relatifs aux PME n'était pas disponible lors de l'échange d'informations. Ces données doivent être fournies en vue de la prochaine révision du document, de façon à pouvoir tenir compte de la situation particulière de ces entreprises.

Il est recommandé de procéder à la révision de ce document dans quatre ans, afin d'évaluer les points énumérés ci-dessus, notamment.

REFERENCES

[tm 1, Davy Consultants (UK) 1993]

HMIP (UK)

Davy Consultants (UK) 1993

Pollution Control for Magnesium Production Processes

[tm 2, McLellan and Partners Ltd, Surrey 1993]

HMIP - UK

McLellan and Partners Ltd, Surrey 1993

Pollution Control in the Secondary Aluminium Industry

[tm 3, McLelland and Partners Ltd., Surrey 1993]

HMIP - UK

McLelland and Partners Ltd., Surrey 1993

Pollution Control in the Titanium Industry

[tm 4, Hatch Associates Ltd 1993]

HMIP - UK

Hatch Associates Ltd 1993

Pollution Control for Secondary Lead Production

[tm 5, B R Lerwill, St. barbara Consultancy Services 1993]

HMIP - UK

B R Lerwill, St. barbara Consultancy Services 1993

Pollution Control in the Precious Metals Industry

[tm 6, McLellan and Partners Ltd, Surrey 1993]

HMIP - UK

McLellan and Partners Ltd, Surrey 1993

Pollution Control in the Primary Aluminium Industry

[tm 8, St. Barbara Consultancy Services 1993]

HMIP

St. Barbara Consultancy Services 1993

Pollution Control for the Refractory Metals Industries

[tm 9, Hatch Associates Ltd 1993]

HMIP - UK

Hatch Associates Ltd 1993

Pollution Control for the Tin, Bismuth and Silicon Industries

[tm 10, Hatch Associates Ltd. 1993]

HMIP - UK

Hatch Associates Ltd. 1993

Pollution Control for Cadmium and Mercury Production

[tm 11, Saint Barbara Consultancy Services 1993]

HMIP - UK

Saint Barbara Consultancy Services 1993

Pollution Control in the Cobalt and Nickel Industry

[tm 12, Hatch Associates Ltd 1993]

HMIP - UK

Hatch Associates Ltd 1993

Pollution Control for Primary Zinc Production

[tm 13, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Process for the Production of Zinc and Zinc Alloys

[tm 14, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production of Lead and Lead Alloys

[tm 15, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production of Refractory Metals

[tm 16, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production, Melting and Recovery of Cadmium, Mercury and their Alloys

[tm 17, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production of Aluminium

[tm 18, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production of Copper and Copper Alloys

[tm 19, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Processes for the Production of Precious Metals and Platinum Group Metals

[tm 20, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

The Extraction of Nickel by the Carbonyl Process and the Production of Cobalt and Nickel Alloys

[tm 21, HMIP - UK 1994]

HMIP - UK

HMIP - UK 1994

Tin and Bismuth Processes

[tm 22, DGXI 1991]

European Commission, DG XI

Technical BAT Note Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Industrial Plants

[tm 23, OSPARCOM 1996]

OSPAR

OSPAR 1996

Draft PARCOM Recommendation concerning BAT and Best Environmental Practice for the Primary Non-Ferrous metal Industry (Zinc, Copper, Lead and Nickel)

[tm 24, DFIU 1996]

DFIU-University Karlsruhe (D)

DFIU-University Karlsruhe (D) 1996

Emission control at stationary sources in Germany; part I - sulphur and nitrogen oxides

[tm 25, DFIU 1996]

DFIU-University Karlsruhe (D)

DFIU-University Karlsruhe (D) 1996

Emission control at stationary sources in Germany; part II - heavy metals

[tm 26, OSPARCOM 1996]

Oslo and Paris Commissions

Oslo and Paris Commissions 1996

Description of BAT for the Primary Production of Non-Ferrous Metals (Zinc, Copper, Lead and Nickel)

[tm 27, McLellan and Partners Ltd., Surrey 1993]

HMIP - UK

McLellan and Partners Ltd., Surrey 1993

Pollution Control in the Copper Industry

[tm 28, WRC 1993]

European Commission DG XI

M Barry, T F Zabel and C Young 1993

Study on the Technical and Economic Aspects of Measures to reduce (on the Basis of Best

Available Technology) the Pollution of Water and Other Environmental Areas from the Non-Ferrous Metal Industry (Contract B6612-90-006931)

[tm 29, OSPARCOM 1997]

Oslo and Paris Commissions

Oslo and Paris Commissions 1997

Description of Existing Techniques and Best Available Techniques in the Aluminium Electrolysis Industry

[tm 30, EPA (IRL) 1996]

Environmental Protection Agency (IRL)

Environmental Protection Agency (IRL) 1996

Integrated Pollution Control Licensing - Batneec Guidance Note for the Extraction of Alumina

[tm 31, Hydro Aluminium a.s., Elkem Aluminium ANS (N) 1994]

Hydro Aluminium a.s., Elkem Aluminium ANS (N)

Hydro Aluminium a.s., Elkem Aluminium ANS (N) 1994

The Norwegian Aluminium Industry and the Local Environment

[tm 32, NL Al 1998]

Dutch Ministry of Environment, Dept. Air /Energy

Witteveen+Bos, Deventer (NL) 1998

Dutch Notes on BAT for the Production of Primary Aluminium

[tm 33, Mantle 1988]

E C Mantle, Metallurgical & Environm. Consultant 1988

Potential for Air Pollution Emissions from the Aluminium Industry and the Best Available Technology for Abatement (final report)

[tm 34, US EPA 1995]

US EPA

US EPA 1995

EPA Office of Compliance Sector Notebook Project Profile of the Nonferrous Metals Industry

[tm 35, UNECE 1995]

Economic Commission for Europe

Heavy Metals Emissions - Long-range Transboundary Air Pollution

[tm 36, Panorama 1997]

European Commission - DG III

Panorama of EU Industry 1997 - An extensive review of the situation and outlook of the manufacturing and service industries in the EU

[tm 37, Mounsey 1995]

COPPER 95 International Conference

Mounsey, E.N. 1995

Copper Bearing Materials

[tm 38, Ausmelt 1995]

Ausmelt Ltd., Australia

EAF Dust Processing with Ausmelt Technology

[tm 39, Lightfoot 1994]

Ausmelt Ltd., Australia

Lightfoot, Brian 1994

Waste Treatment by Ausmelt Technology

[tm 40, Ausmelt 1996]

Ausmelt Ltd, Australia

Treatment of Incinerator Ash in an Ausmelt Furnace System

[tm 41, Ausmelt 1996]

Ausmelt Ltd., Australia

Treatment of Lead and Zinc Residues using the Ausmelt Process

[tm 42, Ausmelt 1996]

Ausmelt Ltd., Australia

Application of Ausmelt Technology to the Recycling of Spent Pot Liner for the Aluminum Industry

[tm 43, Ausmelt 1996]

Ausmelt Ltd., Australia

Short, W.E.; Sutton, D.J.; Swayn, G.P. 1996

Commercial application of Ausmelt's top submerged lance technology in the lead industry

[tm 44, Ausmelt 1997]

Ausmelt Ltd., Australia

Sofra, J.; Mounsey, E.N.; Piret, N.L. 1997

Technology in Secondary Copper Smelting and Converting

[tm 45, Floyd 1996]

Ausmelt Ltd., Australia

Floyd, J.M. 1996

The Third Decade of Top Submerged Lance Technology

[tm 46, Svens 1985]

Metal News, Vol 7

Svens, K. 1985

Outokumpu Mercury Recovery

[tm 47, Mahmoud 1996]

International Precious Metals Institute

Dr. Mahmoud I. El Guindy 1996

Precious Metals 1996 - Proceedings of the Twentieth International Precious Metals
Conference, Newport Beach, California

[tm 48, Järvinen, O.]

Wenmec Systems Oy

Järvinen, O.

Wenmec/Outokumpu Technology Update of Current Developments for Anode Slime

[tm 49, Järvinen, O.]

Wenmec Systems Oy

Järvinen, O.

Current Developments for Anode Slime Precious Metals Treatment

[tm 50, Hyvärinen 1989]

Journal of Metals

Hyvärinen, O.; Lindroos, L.; Yllö, E. 1989

Recovering Selenium from Copper Refinery Slimes

[tm 51, Kuusisto 1986]

Outokumpu Oy

Kuusisto, R. 1986

Process Equipment for Electrolyte Purification and Anode Slime Treatment

[tm 52, Hyvärinen 1984]

113th AIME Annual Meeting

Hyvärinen, O. 1984

Selenium and Precious Metals Recovery from Copper Anode Slimes

[tm 53, Newman, C.J.; Probert, T.I.; Weddick, A.J. 1998]

Kennecott Utah Copper Corporation, Magna, Utah

Newman, C.J.; Probert, T.I.; Weddick, A.J. 1998

Kennecott Utah Copper Smelter Modernization

[tm 54, Asteljoki 1985]

Annual meeting of AIME, New York, Feb. 85

Asteljoki, J.; Kytö, M. 1985

Alternatives for Direct Blister Copper Production

[tm 55, Biswas]

Biswas, A.K.; Davenport, W.G.

Extractive Metallurgy of Copper

[tm 56, Kojo]

Kojo, I.V.; Riekkola-Vanhanen, M.

Copper Production by Leaching - Solvent Extraction – Electrowinning

[tm 57, Knuutila 1997]

Outokumpu Harjavalta Metals Oy, Finland

Knuutila, K. 1997

Nickel electrolysis process

[tm 58, Knuutila]

Outokumpu Harjavalta Metals Oy, Finland

Knuutila, K.; Hultholm, S.-E., Saxén, B

New Nickel Process Increasing Production

[tm 59, Kojo]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Kojo, I.V.; Mäkinen, T.; Hanniala, P.

Direct Outokumpu Nickel Flash Smelting Process (DON)

[tm 60, Hanniala 1994]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Hanniala, P. 1994

Outokumpu Flash Technology for the Existing Copper Smelters

[tm 61, Kytö 1996]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Kytö, M.; Kojo, I.V.; Hanniala, P. 1996

Outokumpu Flash Technology Meeting the Environmental and Business Challenges of the Next Century

[tm 62, Hanniala 1996]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Hanniala, P. 1996

Advances in Copper Smelting Technology: Aconomic and Quality Considerations

[tm 63, Helle]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Helle, L.; Kojo, I.

Copper production by flash-converting technology: process and equipment

[tm 64, Kennecott 1995]

Mining Environmental Management

Kennecott's smelter and refinery modernisation

[tm 65, Hanniala 1996]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Hanniala, P. 1996

The Environmental and Economic Benefits of the Outokumpu Flash Smelting Technology for Different Kinds of Concentrates

[tm 66, Outokompu 1997]

Outokompu Harjavalta Metals Oy

Sulphur Dioxide Emissions

[tm 67, George 1995]

Copper 95 - International Conference

George, D.B.; Gottling, R.J.; Newman, C.J. 1995

Modernization of Kennecott Utah copper smelter

[tm 68, Hanniala 1989]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Hanniala, T.P.T.; Sulanto, J.S. 1989

The Development Trends of the Outokumpu Flash Smelting Process for the Year 2000

[tm 69, Hanniala 1995]

Outokumpu Engineering Contractors Oy, Finland

Hanniala, P.; Kojo, I.V. 1995

Utilization of Outokumpu Flash Technology to meet Environmental Requirements

[tm 70, Mercury Expert Group 1998]

Minas de Almadén y Arrayanes, S.A.

Metalurgia del Mercurio - Métodos de Producción de Mercurio

[tm 71, various 1974]

Conference Barcelona 6 - 10.5.74

various 1974

Congreso Internacional del Mercurio (Tomo I, II),

[tm 72, Ajima 1994]

Metallurgical Review of MMIJ, Vol.11, No.1

Ajima, S.; Hayashi, M.; Shimizu, T. 1994

Copper Smelting and Refining at Naoshima

[tm 73, Shibasaki 1993]

Mitsubishi Materials Corp., Japan

Shibasaki, T.; Hayashi, M.; Nishiyama, Y. 1993

Recent Operation at Naoshima with a larger Mitsubishi Furnace Line

[tm 74, Mitsubishi 1993]

Mitsubishi Materials Corporation, Japan

The Mitsubishi Process - Technical and Environmental Advantages

[tm 75, Theodore 1992]

ETS International, Inc (USA)

Theodore, L.; Buonicore, A. 1992

Air Pollution Control Equipment

[tm 76, Startin 1998]

Cerafil (Ceramic Filter Elements), UK

Startin, A. 1998

Solve your gas filtration problems

[tm 77, Al Expert Group 1998]

European Aluminium Association EAA

Nordheim, E. 1998

Minutes from IPPC BREF Notes - Aluminium Expert Group Meeting - Brussels 27 April 1998

[tm 78, Soud 1993]

IEA Coal Research

Soud 1993

Particulate control handbook for coal-fired plants

[tm 79, Soud,]

IEA Coal Research (UK)

Soud, H.N.

Developments in particulate control for coal combustion

[tm 80, Warner, 1998]

CIM/CMMI/MIGA Montréal 98

Warner, N.A. 1998

Copper and Nickel Smelting With Virtually Zero Gas Emission - A Vision for the Future

[tm 81, Warner 1998]

TMS, Annual Meeting

Warner, N.A. 1998

Gas Recirculation and Endothermic Dissociation of Sulphur Trioxide for Smelting high Energy Sulphides with Technically Pure Oxygen

[tm 82, Warner, 1998]

AusIMM 98 - The Mining Cycle

Warner, N.A. 1998

Refined Zinc Metal Production at the Minesite

[tm 83, Ministerium in NRW (D) 1997]

Ministerium Umwelt, Raumordnung u. Landwirtschaft

Ministerium in NRW (D) 1997

NE-Metallindustrie - Betreiberleitfaden für Anlagen zum Gießen in verlorenen Formen - Sandgußverfahren

[tm 84, Ministerium NRW (D) 1997]

Ministerium Umwelt, Raumordnung u. Landwirtschaft

Ministerium NRW (D) 1997

NE-Metallindustrie - Betreiberleitfaden für Anlagen zum Gießen in Dauerformen - Druckgußverfahren

[tm 85, NRW (D) 1997]

Ministerium Umwelt, Raumordnung u. Landwirtschaft

NRW (D) 1997

NE-Metallindustrie - Betreiberleitfaden für Anlagen zum Schmelzen von Schwermetallen

[tm 86, Ministerium NRW (D) 1997]

Ministerium Umwelt, Raumordnung u. Landwirtschaft

Ministerium NRW (D) 1997

NE-Metallindustrie - Betreiberleitfaden für Anlagen zum Schmelzen von Leitmetallen

[tm 87, Brueggemann 1998]

ASARCO Inc. (USA)

Brueggemann, M.; Caba, E. 1998

Operation of the Contop Process at the Asarco El Paso Smelter

[tm 88, Torres 1998]

Sulfide Smelting

Torres, W.E. 1998

Current Teniente Converter Practice at the SPL ILO Smelter

[tm 89, Arthur 1998]

ISASMELT

Arthur, P. 1998

MIM Process Technologies

[tm 90, Al Expert Group 1998]

EEA

Nordheim, E. 1998

Aluminium Expert Group Site Visits

[tm 91, OSPARCOM 1998]

Ospar Point Workshop

UBA (D) 1998

Revision of the Draft Decision on Limits for Emissions to the Atmosphere and Discharges into Water of Contaminants from the Primary Non-Ferrous Metal Industry

[tm 92, Copper Expert Group 1998]

Eurometaux (B)

Traulsen, H. 1998

Plant Information - Copper Industry (Draft)

[tm 93, OSPARCOM 1992]

Paris Commission

Paris Commission 1992

BAT for the Preparation of Anodes in the Primary Aluminium Industry

[tm 94, Ni Expert Group 1998]

Eurometaux

Laine, L. 1998

The Support of the Nickel and Cobalt Section of the BREF Note

[tm 95, García-Agocheaga 1998]

ASER (E)

García-Agocheaga, B. 1998

Zinc Recovery Processes

[tm 96, Laine, L. 1998]

Outokumpu (SF)

Laine, L. 1998

NI Production

[tm 97, Ma, T.; Sarvinis, J. et al. 1998]

Hatch Associates Ltd. (CAN)

Ma, T.; Sarvinis, J. et al. 1998

Recent Developments in D.C. Furnace Design

[tm 98, Jones, R.T.; Curr, T.R. 1998]

Mintek (South Africa)

Jones, R.T.; Curr, T.R. 1998

Plasma Developments in Africa

[tm 99, Bontoux, L.; Leone, F. 1997]

IPTS, European Commission

Bontoux, L.; Leone, F. 1997

The Legal Definition of Waste and it's Impact on Waste Management in Europe

[tm 100, NL Al 1998]

V.R.O.M. (NL)

Lijftogt, J.A.; van Kuijk, A.H.J. et al 1998

Dutch Notes on BAT for the Production of Primary Aluminium

[tm 101, NL Zn 1998]

V.R.O.M. (NL)

Lijftogt, J.A.; van Kuijk, A.H.J. et al 1998

Dutch Notes on BAT for the Production of Primary Zinc

[tm 102, DFIU Lead 1998]

University Karlsruhe DFIU (D)

Hähre, S. 1998

Report on BAT in German Zinc and Lead Production (Draft)

[tm 103, Rodermund 1997]

Metaleurop Weser Zink (D)

Rodermund, R. 1997

New Gas Cleaning Technology in the Solution Purification of a Zinc Smelter

[tm 104, Various 1990]

Technology of Metalforming

[tm 105, PM Expert Group 1998]

Degussa (D)

Hasenpusch, W. 1998

Precious Metals

[tm 106, Farrell, 1998]

European IPPC Bureau

Farrell, F. 1998

Personal Discussions

[tm 107, Ullmann's 1996]

Ullmann's Encyclopedia

Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry

[tm 108, Winter 1992]

Umweltbundesamt (A)

Bericht über die Umweltsituation an ausgewählten langjährigen Industriestandorten

[tm 109, UNEP 1993]

UNEP

Raffinot, P.; Bozec, C. 1993

Environmental Management of Nickel Production

[tm 110, UNEP 1987]

United Nations Environment Programme (UNEP)

United Nations Environment Programme (UNEP) 1987

Environmental Aspects of Nickel Production

[tm 111, Salmon 1998]

Kennecott Utah Copper Corporation

Salmon, L. 1998

Emission Information

[tm 112, Various 1998]

European IPPC Bureau

Technical information from TWG -meeting presentations

[tm 113, Anthony 1997]

Minerals Industry International

Anthony, T.; Flett, D.S. 1997

Nichel Processing Technology: A Review

[tm 114, Shunan Denko, Japan 1998]

Shunan Denko, Japan

Shunan Denko, Japan 1998

High-Carbon Ferrochrome Smelting Process Cuts Electric Power Consumption

[tm 115, Outokumpu Oy (SF) 1998]

Outokumpu Oy (SF)

Outokumpu Oy (SF) 1998

Outokumpu oy Ferrochrome Process Results in Energy Savings

[tm 116, ALFED 1998]

ALFED (Aluminium Federation ltd) UK

ALFED (Aluminium Federation ltd) UK 1998

Secondary Aluminium Refining and Remelting

[tm 117, Copper Expert Group 1998]

Eurometaux

Eurometaux 1998

Fabrication of Semi-Finished Products from Copper and Copper Alloys

[tm 118, ETSU (UK) 1996]

ETSU (UK)

ETSU (UK) 1996

Waste heat recovery from high temperature gas streams

[tm 119, VDI 3467 1998]

VDI (D)

VDI (3467) 1998

Production of Carbon and Electrographite Materials

[tm 120, Lead and Zinc Expert Group 1999]

Eurometaux

Krüger, J. 1999

Proposal for a BREF-note for Pb, Zn, Cd, Sb (Part 1)

[tm 121, Hoogovens 1998]

Hoogovens (NL)

Laheye, R.; Burggraaf, D. 1998

Greenmelt: An Environmentally Sound Remelting Concept

[tm 122, McLellan 1998]

ETSU

McLellan 1998

Electromagnetic Pumping Improves the Efficiency of Melting Aluminium

[tm 123, McLellan 1998]

ETSU

McLellan 1998

Electromagnetic Pumping of Aluminium; Audit of Fluxless Melting Technology at Calder Aluminium Ltd., Willington

[tm 124, DFIU Cu 1999]

University Karlsruhe (DFIU)

Rentz, O.; Krippner, M.; Hähre, S. 1999

Report on BAT in German Copper Production (Final Draft)

[tm 125, ETSU 1994]

Dept. of the Environment

ETSU 1994

Oxy-Fuel Melting of Secondary Aluminium

[tm 126, Robson 1998]

UK Environment Agency

Robson, T.G.; Coleman, J. 1998

A Review of the Industrial Uses of Continuous Monitoring Systems: Metals Industry Processes

[tm 127, ETSU 1994]

ETSU

ETSU 1994

Energy Efficiency in the Provision and Use of Industrial Gases

[tm 128, Euro Alliages (B) 1998]

Euro Alliages (B)

Euro Alliages (B) 1998

Ferromolybdenum Notes

[tm 129, Madelin 1991]

EMC '91: Non-Ferrous Metallurgy

Madelin, B; Ferquel, S.; Martin, J.L. 1991

Lead blast-furnace evolution: a new approach

[tm 130, Chadwick 1994]

Mining Magazine

Chadwick, J. 1994

Zaldivar Copper Mine

[tm 131, Davies 1998]

UK Environment Agency

Davies, N. 1998

Emissions from Carbon Fibre Production

[tm 132, Kola 1997]

XX International Mineral Processing Congress

Kola, R. et al 1997

Depuration and upgrading of waelz oxides in a new hydrometallurgical plant

[tm 133, Eurometaux Copper Industry 1998]

Eurometaux Copper Industry

Eurometaux Copper Industry 1998

Draft Report from IPPC BAT Copper Experts Group Meeting, Hamburg July 1998

[tm 134, Nordheim 1998]

European Aluminium Association

European Aluminium Association 1998

Aluminium BREF Note - Primary Aluminium Section on Spent Potlinings

[tm 135, Ahmadzai, H. 1994]

Swedish EPA

Ahmadzai, H. 1994

Survey and Trends Pertaining to Control Methodologies in the Primary Smelting Industry

[tm 136, Torfs 1996]

Iron Control in Hydrometallurgy

Torfs, K.J. 1996

The Union Minière Goethite Process: Plant Practice and Future Prospects

[tm 137, Copper Expert Group 1998]

Metallurgiacal Consulting Traulsen GmbH

Eurometaux, Copper Industry 1998

Technologies Applied Outside the EU and New Technologies (draft 2nd version)

[tm 138, Gershel 1998]

EMCI

Gershel, T. 1998

Copper and its Alloys

[tm 139, Finland Zn 1999]

Finnish EPA

Fugleberg, S. 1999

Finnish Expert Report on BAT in Zinc Production

[tm 140, Finland Cu 1999]

Finnish EPA

Riekkola-Vanhanen, M. 1999

Finnish Expert Report on BAT in Copper Production and By-Production of Precious Metals

[tm 141, Niemelä, P. 1999]

Finnish EPA

Niemelä, P. 1999

Finnish Expert Report on BAT in Ferrochromium Production

[tm 142, Finland Ni 1999]

Finnish EPA

Riekkola-Vanhanen, M. 1999

Finnish Expert Report on BAT in Nickel Production

[tm 143, Ferro-Alloy-Expert-Group 1998]

Euroalliages (B)

Ferro-Alloy-Expert-Group 1998

BAT for Ferro-Alloy-Production

[tm 144, Elkem Asa 1998]

Elkem Asa

Elkem Asa 1998

Company Profile Including Development in Stack Emission Filtration Technology

[tm 145, Boin, U.; Linsmeyer, T.; Neubacher, F.; Winter, B. 1998]

UBA (A)

Boin, U.; Linsmeyer, T.; Neubacher, F.; Winter, B. 1998

Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC Richtlinie

[tm 146, Byrdziak 1998]

Environment & Innovation in Mining & Mineral Tech.

Byrdziak, H.; Dobrzanski, J.; Garbaczewski, J. 1998

Environmental Measures by the Polish Copper Industry

[tm 147, Binder, F.; Ettmayer, P.; Schaschel, E. 1986]

Carl Hanser Verlag München Wien

Binder, F.; Ettmayer, P.; Schaschel, E. 1986

Chemische Technologie

[tm 148, Dairymple, I. 1999]

EA Technology Ltd. Chester (UK)

Dairymple, I. 1999

Setting New Standards of Performance and Economy for Effluent Treatment and Heavy and Precious Metal Recovery

[tm 149, Kemmer, F. N. 1988]

Nalco Chemical Company

Kemmer, F. N. 1988

The Nalco Water Handbook (second edition)

[tm 150, FL Smidth (DK) 1992]

FL Smidth (DK)

FL Smidth (DK) 1992

GSC Processing of Carbonate Rocks

[tm 151, Kolbeinsen, L. et al. 1995]

INFACON (N)

Kolbeinsen, L. et al. 1995

Energy Recovery in the Norwegian Ferro Alloy Industry

[tm 152, Schei, A.; Tuset, J.; Tveit, H. 1998]

Tapir Forlag, Trondheim (N)

Schei, A.; Tuset, J.; Tveit, H. 1998

Production of High Silicon Alloys

[tm 153, Wintersto, D.]

Elkem ASA (N)

Wintersto, D.

Company Profile Including Development in Stack Emission Filtration Technology

[tm 154, Nestaas, I.; Lindstad, T.; Kolbeinsen, L.]

DNV Industri Norge AS (N)

Nestaas, I.; Lindstad, T.; Kolbeinsen, L.

Results of a Comprehensive Survey of Emissions of Air Pollutants from Ferrosilicon and

High Purity Silicon Metal Furnaces

[tm 155, Tveit, H.]

INFACON 8

Tveit, H.

Environmental Aspects of the Ferro Alloy Industry

[tm 156, Lindstad, T.]

INFACON 8

Lindstad, T.

CO₂-Emissions and the Ferroalloys Industry

[tm 157, Lindstad, T.; Kolbeinsen, L. 1994]

SINTEF, Trondheim (N)

Lindstad, T.; Kolbeinsen, L. 1994

10th International Ferro-Alloys Conference

[tm 158, Monsen, B.; Lindstad, T.; Tuset, J.K.]

SINEF, Trondheim (N)

Monsen, B.; Lindstad, T.; Tuset, J.K.

CO₂ Emissions from the Production of Ferrosilicon and Silicon metal in Norway

[tm 159, VDI 3478 1996]

VDI (D)

VDI 3478 (D) 1996

Biologische Abgasreinigung - Biowäscher und Rieselbettreaktoren Biological Waste Gas Purification - Bioscrubbers and Trickle Bed Reactors

[tm 160, Winter, B., Stubenvoll, J.; Wiesenberger, H. 1999]

UBA (A)

Winter, B., Stubenvoll, J.; Wiesenberger, H. 1999

Stand der Technik in der Sekundärkupfererzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie

[tm 161, Petersen 1999]

Umweltbehörde, Hamburg (D)

Petersen, K. 1999

Determination of specific emission values (BAT)

[tm 162, Coulton, G. 1999]

London & Scandinavian Metallurgical Co. Ltd.

Coulton, G. 1999

IPPC BREF Notes- Refractory Metals (Chromium) and Ferro Alloys (Ferro Titanium)

[tm 163, Steudtner 1998]

TÜV Ecoplan, Umwelt GmbH, Mönchengladbach (D)

Steudtner 1998

Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen im Rahmen des Projektes RWO an den Dachreitern der Konverterhalle sowie des Nebenhaubenfilters (Esse 48) in der Rohhütte Werk Ost bei der Firma Norddeutsche Affinerie Hamburg

[tm 164, Bobeth 1999]

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Bobeth, A. 1999

Precious Metals

[tm 165, Waquier, G.; Bendixen, O.R. 1999]

Haldor Topsoe A/S (DK)

Waquier, G.; Bendixen, O.R. 1999

Topsoe WSA Technology for Desulphurization of Off-gas from Pb and Zn Smelters

[tm 166, Waquier, G.; Bendixen, O.R. 1996]

Haldor Topsoe A/S (DK)

Waquier, G.; Bendixen, O.R. 1996

Topsoe WSA Technology for Desulphurization of SO₂ Gas from PB Sintering Machine at

Metaleurop, Noyelles-Godault, France

TOPSOE Technologies (DK)

Bendixen, O. R. 1997

H₂SO₄ from Low Strength Gases

[tm 168, Neuhaus, W. 1999]

Global Symposium on Recycling, Waste Treatment etc

Neuhaus, W. 1999

Enforcement Programme Concerning Avoidance and Recycling of Waste at non-ferrous

Metal Smelting Plants and Foundries in North-Rhine Westphalia

[tm 169, Clark, J.H. 1995]

Blackie Academic & Professional

Clark, J.H. 1995

Chemistry of Waste Minimization

[tm 170, U.S. Department of Commerce, Springfield (USA) 1995]

National Technical Information Service (NTIS)

U.S. Department of Commerce, Springfield (USA) 1995

Revitalize the US Silicon/Ferrosilicon Industry Through Energy-Efficient Technology,

Final Report, Addendum Furnace Modeling

[tm 171, Steil 1999]

DFIU, University Karlsruhe (D)

Steil, H.U.; Hähre, S. 1999

Personal Communication

[tm 172, Cunningham, L.D. 1997]

U.S.G.S.

Cunningham, L.D. 1997

Columbium (Niobium) and Tantalum

[tm 173, Papp, J.F. 1997]

U.S.G.S.

Papp, J.F. 1997

Chromium

[tm 174, Jones, T.S. 1997]

U.S.G.S.

Jones, T.S. 1997

Manganese

[tm 175, Shedd, K.B. 1997]

U.S.G.S.

Shedd, K.B. 1997

Tungsten

[tm 176, Blossom, J.W. 1997]

U.S.G.S.

Blossom, J.W. 1997

Molybdenum

[tm 177, Gambogi, J. 1997]

U.S.G.S.

Gambogi, J. 1997

Titanium

[tm 178, Blossom, J.W. 1997]

U.S.G.S.

Blossom, J.W. 1997

Rhenium

[tm 179, Hedrick, J.B. 1997]

U.S.G.S.

Hedrick, J.B. 1997

Zirconium

[tm 180, Fenton, M. 1997]

U.S.G.S.

Fenton, M. 1997

Ferroalloys

[tm 181, Winter 1998]

UBA (A)

UBA (A) 1998

Emissionserklärung Treibacher Chemische Werke

[tm 182, International Tungsten Industry Association (UK) 1999]

International Tungsten Industry Association (UK)

International Tungsten Industry Association (UK) 1999

BREF Note for Tungsten

[tm 183, Encyclopaedia Britannica 1996]

Encyclopaedia Britannica

Encyclopaedia Britannica 1996

Extraction and Processing Industries

[tm 184, London & Scandinavian Metallurgical Co ltd. 1999]

London & Scandinavian Metallurgical Co ltd.

London & Scandinavian Metallurgical Co ltd. 1999

Titanium Sware Degreasing Plant

[tm 185, London & Scandinavian Metallurgical Co ltd. 1999]

London & Scandinavian Metallurgical Co ltd.

London & Scandinavian Metallurgical Co ltd. 1999

Production of Chromium Metal

[tm 186, ABB (S) 1999]

ABB (S)

ABB (S) 1999

Information on Systems for Pollution Control

[tm 187, Elkem (N) 1999]

Elkem (N)

Elkem (N) 1999

Energy recovery from hot gas in ferroalloy and silicon industry

[tm 188, SFPO (F) 1999]

SFPO (F)

SFPO (F) 1999

Energy balance

[tm 189, Kramer, D. 1997]

U.S.G.S.

Kramer, D. 1997

Magnesium

[tm 190, Ober, J.A. 1997]

U.S.G.S.

Ober, J.A. 1997

Lithium

[tm 191, Lurgi 1998]

Lurgi GmbH

Radial Flow Scrubber for Dedusting, Cooling, Gas Absorption

[tm 192, Lurgi 1998]

Lurgi GmbH

Electrostatic Precipitators

[tm 193, Lurgi 1998]

Lurgi GmbH

Corrosion-Proof Wet Precipitators

[tm 194, Lurgi 1997]

Lurgi GmbH

Low Pressure Pulse Technology

[tm 195, SFPO 1999]

SFPO

Dedusting Equipment of the Casting Area on BF Nr. 7 of SFPO

[tm 196, Elkem 1998]

Elkem-Spigerverket a/s, Oslo, Norway

Semi-Closed Furnace with waste Heat Boiler and Filter

[tm 197, Mezger 1999]

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemb.

Mezger, G. 1999

German Aluminium Expert Group

[tm 198, Lurgi AG, Frankfurt/M. (D) 1991]

Lurgi AG, Frankfurt/M. (D)

Lurgi AG, Frankfurt/M. (D) 1991

Cleaning of Process and Waste Gases

[tm 199, Finkeldei, L. 1999]

Finkeldei, L.

Finkeldei, L. 1999

Personal Discussions

[tm 200, Kantola, E. 1999]

Lapin Ympäristökeskus

Kantola, E. 1999

Dust emissions from closed electric arc furnaces for ferro-chrome production

[tm 201, Velten 1999]

Norddeutsche Affinerie

Velten 1999

Primary Smelter, Converter Secondary Hood System

[tm 202, EnviroSense 1995]

EnviroSense

Closed Ferro-Alloy Furnace with Dry Removal

[tm 203, Amundsen 1999]

Norsk Hydro ASA

Amundsen 1999

Primary magnesium production techniques

[tm 204, Amundsen 1999]

Norsk Hydro ASA

Amundsen 1999

Primary magnesium production techniques

[tm 205, Sadaci S.A. (B) 1999]

Sadaci S.A. (B)

Sadaci S.A. (B) 1999

Production of Sulphuric Acid with a WSA plant

[tm 206, TGI 1999]

Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente

Tecnología y Gestión de la Innovación S.A. 1999

Metalurgia no Férrea, Epígrafes 2.5.a, 2.5b

[tm 207, TGI 1999]

Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente (E)

Tecnología y Gestión de la Innovación S.A. (E) 1999