



COMMISSION EUROPÉENNE



Document de référence sur les meilleures techniques
disponibles

Fabrication des céramiques

Août 2007

Ce document est la traduction de la version anglaise publiée par la Commission européenne
qui seule fait foi.

Traduction V 0

Le présent document fait partie d'une série de documents énumérés ci-après (au moment de le rédiger, ces documents restent encore à élaborer) :

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles (MTD) . . .	Code
Grandes installations de combustion	LCP
Raffineries de pétrole et de gaz	REF
Production de fer et d'acier	I&S
Industrie transformatrice des métaux ferreux	FMP
Industries des métaux non ferreux	NFM
Forges et fonderies	SF
Traitement superficiel des métaux et plastiques	STM
Industries manufacturières de ciment et de chaux	CL
Industrie manufacturière du verre	GLS
Industrie manufacturière de la céramique	CER
Industrie de la chimie organique à grande échelle	LVOC
Fabrication de produits chimiques organiques de haute qualité	OFC
Production de polymères	POL
Industrie du chlore et des alcalis	CAK
Industries productrices à grande échelle de produits chimiques inorganiques, d'ammoniaque, d'acides et d'engrais	LVIC-AAF
Industries productrices à grande échelle de produits chimiques inorganiques, de matières solides et diverses	LVIC-S
Production de produits chimiques inorganiques spécialisés	SIC
Traitement conjoint des eaux usées et des gaz usés / Systèmes de management dans le secteur de la chimie	CWW
Industries de traitement des déchets	WT
Incinération des déchets	WI
Management des queues de production et des morts terrains dans les activités minières	MTWR
Industrie de la pulpe et du papier	PP
Industrie des textiles	TXT
Tannage des peaux et cuirs	TAN
Abattoirs et industries des sous-produits d'origine animale	SA
Industries alimentaires, des boissons et laitières	FDM
Élevage intensif de la volaille et des porcs	ILF
Traitement superficiel à l'aide de solvants organiques	STS
Systèmes de refroidissement industriel	CV
Émissions à partir du stockage	ESB
Document de référence ...	
Principes généraux de surveillance	MON
Économie et interaction entre les milieux	ECM
Techniques amélioratrices de l'efficacité énergétique	ENE

RÉSUMÉ

Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF - Best Available Techniques Reference document) intitulé «Fabrication des céramiques» rend compte de l'échange d'informations mené en application de l'article 16, paragraphe 2, de la directive 96/61/CE du Conseil (directive IPPC). Le présent résumé, qu'il convient de lire à la lumière de la préface du BREF qui en explique les objectifs, l'utilisation et les termes juridiques, décrit les principales constatations faites, les principales conclusions relatives aux meilleures techniques disponibles (MTD) ainsi que les niveaux d'émission et de consommation associés. Il se suffit à lui-même mais, en tant que résumé, il ne rend pas compte de toutes les complexités du texte complet du BREF. Il n'a donc pas vocation à se substituer au BREF intégral en tant qu'outil pour la prise de décision sur les meilleures techniques disponibles, et ne saurait dispenser de la lecture des chapitres 4 et 5.

CHAMP D'APPLICATION DU BREF

Le présent document concerne les activités industrielles spécifiées au point 3.5 de l'annexe I de la directive 96/61/CE, à savoir:

«3.5. Installations destinées à la fabrication de produits céramiques par cuisson, notamment de tuiles, de briques, de pierres réfractaires, de carrelages, de grès ou de porcelaines, avec une capacité de production supérieure à 75 tonnes par jour, et/ou une capacité de four de plus de 4 m³ et une densité d'enfournement de plus de 300 kg/m³ par four».

Aux fins du BREF, les activités industrielles relevant de cette description sont désignées sous l'appellation «industrie céramique». Les principaux secteurs, qui sont définis par les produits céramiques fabriqués, sont les suivants:

- Carrelage mural et de sol
- Briques et tuiles
- Articles de table et d'ornement (céramique domestique)
- Produits réfractaires
- Sanitaires
- Céramiques techniques
- Tuyaux en grès vitrifié
- Granulats d'argile expansée
- Abrasifs agglomérés pour meules vitrifiées

Outre ces activités de fabrication principales, le BREF porte sur les activités directement associées qui sont susceptibles d'avoir des effets sur les émissions ou sur la pollution. Il englobe donc l'ensemble des activités, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'expédition des produits finis. Certaines activités, comme l'extraction des matières premières dans les carrières, ne sont pas couvertes parce qu'elles ne sont pas considérées comme étant directement associées à l'activité primaire.

L'INDUSTRIE CÉRAMIQUE

Le terme «céramique» (produit en céramique) désigne en règle générale des matériaux inorganiques (pouvant avoir un certain contenu organique), transformés de façon permanente par cuisson. Outre les matériaux à base d'argile, les céramiques englobent aujourd'hui une multitude de produits renfermant une faible proportion d'argile ou totalement exempts d'argile. Les céramiques peuvent être vernissées ou mates, poreuses ou vitrifiées.

La cuisson des pâtes céramiques produit une transformation "temps-température" des minéraux qui les constituent, pour donner généralement un mélange de nouveaux minéraux et de phases vitreuses.

Les propriétés caractéristiques des céramiques sont leur grande résistance mécanique, leur résistance à l'usure et leur longévité; chimiquement inertes, elles sont non toxiques, résistent à la chaleur et au feu, et ont généralement des propriétés isolantes et parfois aussi une porosité spécifique.

Les matières premières à base d'argile se trouvent un peu partout en Europe, aussi les produits en céramique comme les briques, qui sont relativement peu coûteux (mais qui nécessitent des frais de transport élevés du fait de leur poids) sont-ils fabriqués dans pratiquement tous les États membres. Du fait des traditions en matière de construction et des questions de patrimoine, la taille des unités de production diffère d'un pays à l'autre. Les produits plus spécialisés impliquant des prix plus élevés sont généralement produits dans un petit nombre de pays qui disposent des matières premières nécessaires et – tout aussi important – de compétences et d'un savoir-faire traditionnels.

PRINCIPAUX PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT

En fonction des procédés de production mis en œuvre, les installations de fabrication de produits en céramiques rejettent des émissions dans l'air et dans l'eau et produisent des déchets. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Le type et le volume des polluants atmosphériques, des déchets et des eaux résiduaires dépendent de plusieurs paramètres, notamment des matières premières utilisées, des auxiliaires de fabrication, des combustibles employés et des méthodes de production appliquées:

- Émissions dans l'atmosphère: la fabrication des céramiques peut entraîner des émissions de particules/poussière, de suie et de gaz (oxydes de carbone, oxydes d'azote, oxydes de soufre, composés inorganiques fluorés et chlorés, composés organiques et métaux lourds).
- Émissions dans l'eau: les eaux résiduaires des installations de production contiennent principalement des substances minérales (particules insolubles) et d'autres matières inorganiques, de petites quantités de matières organiques et certains métaux lourds.
- Pertes/déchets: les pertes résultant de la fabrication des céramiques consistent essentiellement en différents types de boues, en articles cassés, moules en plâtre usagés, agents de sorption usés, résidus solides (poussières, cendres) et déchets d'emballage.
- Consommation d'énergie/émissions de CO₂: tous les secteurs de l'industrie céramique sont de grands consommateurs d'énergie, puisqu'une partie essentielle de la fabrication consiste en un séchage suivi d'une cuisson à des températures comprises entre 800 et 2000 °C. Aujourd'hui, le gaz de pétrole liquéfié (propane et butane) et le fioul EL sont principalement utilisés pour la cuisson, mais le fioul lourd, le gaz naturel liquéfié (GNL), le biogaz/la biomasse, l'électricité et les combustibles solides (charbon, coke de pétrole) peuvent également servir de sources d'énergie pour les brûleurs.

PROCÉDÉS ET TECHNIQUES APPLIQUÉS

La fabrication des céramiques fait appel à différents types de fours et à toute une gamme de matières premières pour donner des produits pouvant revêtir diverses formes, tailles et couleurs. Le procédé général de fabrication des céramiques, quant à lui, est plutôt uniforme, en dehors du fait qu'une cuisson en plusieurs étapes est souvent requise pour la fabrication de carrelage mural ou de sol, d'articles domestiques, de sanitaires et de céramiques techniques.

En général, les matières premières sont mélangées puis mises en forme par coulage, pressage ou extrusion. Un apport régulier d'eau facilite le mélange et la mise en forme. Cette eau s'évapore dans les séchoirs et les produits sont ensuite enfournés manuellement – en particulier dans le cas des fours à sole mobile qui sont exploités de façon périodique – ou placés dans des chariots qui progressent jusque dans le four dans le cas des fours tunnels ou des fours à rouleaux, qui fonctionnent en continu. Pour la fabrication des granulats d'argile expansée, on utilise des fours rotatifs.

Durant la cuisson, un gradient de température très précis est nécessaire pour que les produits fassent l'objet du traitement adéquat. Il faut ensuite un refroidissement contrôlé pour que les

produits libèrent leur chaleur progressivement en préservant leur structure céramique. En dernier lieu, les produits sont emballés et entreposés en vue de la livraison.

CONSOMMATIONS ET ÉMISSIONS

Émissions

La transformation des argiles et des autres matières premières des céramiques entraîne inévitablement la formation de poussières, surtout dans le cas des matières sèches. Toutes les opérations de séchage (y compris l'atomisation), de pulvérisation (broyage), de criblage, de malaxage et de transport sont susceptibles de produire des poussières fines. Il se forme également de la poussière lors de la décoration et de la cuisson des articles, ainsi que durant l'usinage et les opérations de finissage réalisées sur les articles cuits. Les émissions de poussières ne proviennent pas uniquement de la transformation des matières premières comme indiqué ci-avant, les combustibles contribuent également aux émissions dans l'air.

Les composés gazeux qui se dégagent lors du séchage et de la cuisson sont essentiellement émis par les matières premières, mais les combustibles rejettent également des polluants gazeux. Il s'agit en particulier de SO_x, NO_x, HF, HCl, de COV et de métaux lourds.

Les eaux résiduaires sont principalement rejetées lorsque les matières argileuses sont débourbées et mises en suspension dans l'eau courante lors du procédé de fabrication et du nettoyage des équipements, mais le fonctionnement des dépoussiéreurs hydrauliques entraîne également des rejets dans l'eau. L'eau qui est directement ajoutée aux mélanges de pâte céramique s'évapore ensuite dans l'atmosphère lors des étapes de séchage et de cuisson.

Les résidus de fabrication sont souvent recyclables et réutilisables dans l'installation du fait des spécifications des produits ou des exigences de fabrication. Les matières qui ne sont pas recyclables en interne quittent l'installation en vue de leur utilisation par d'autres secteurs ou de leur livraison à des installations extérieures qui assurent le recyclage ou l'élimination des déchets.

Consommations

Dans la fabrication des céramiques, la principale consommation d'énergie est celle des fours de cuisson, mais dans de nombreux procédés, le séchage des intermédiaires ou des articles mis en forme consomme également beaucoup d'énergie.

Pratiquement tous les procédés de fabrication des céramiques nécessitent de l'eau, et la bonne qualité de cette eau est essentielle pour la préparation des argiles et des barbotines d'émail, des pâtes céramiques à extruder, des «boues» à mettre en forme, pour la préparation des poudres atomisées, pour le broyage humide ainsi que pour les opérations de lavage et de nettoyage.

L'éventail des matières premières consommées par l'industrie céramique est très large. Il comprend les principaux constituants de la pâte, qui sont consommés en grandes quantités, et divers additifs, liants et matériaux de décoratifs appliqués en surface, qui sont utilisés en plus faibles proportions.

TECHNIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR LA DÉTERMINATION DES MTD

Les aspects importants pour la mise en œuvre de la directive IPPC dans l'industrie céramique sont la réduction des émissions dans l'air et dans l'eau, l'efficacité énergétique, la consommation de matières premières et d'eau, la réduction maximale des pertes/déchets et des eaux résiduelles du processus, ainsi que leur récupération et leur recyclage, et l'efficacité des systèmes de gestion.

Ces aspects sont pris en compte grâce à diverses techniques intégrées au processus de fabrication ou en fin de chaîne, adaptées aux neuf secteurs distincts de l'industrie céramique. Une cinquantaine de techniques de prévention et réduction de la pollution sont présentées dans le BREF, regroupées sous les sept rubriques thématiques suivantes:

Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)

Le choix de la source d'énergie, de la technique de cuisson et la méthode de récupération de chaleur est déterminant pour la conception du four, et ces éléments comptent aussi parmi les principaux facteurs qui influent sur la performance environnementale et sur l'efficacité énergétique du processus de fabrication.

Les principales techniques de réduction de la consommation énergétique, qui peuvent être appliquées séparément ou conjointement, sont énumérées ci-dessous et examinées plus en détail dans le BREF.

- conception améliorée des fours et des séchoirs
- récupération de la chaleur en excès provenant des fours
- cogénération/installations de production combinée de chaleur et d'électricité
- remplacement du fioul lourd et des combustibles solides par des combustibles produisant peu d'émissions
- modification des pâtes céramiques

Émissions de poussières (particules)

Pour éviter les émissions de poussières diffuses ou captées à la source, des techniques et mesures à appliquer séparément ou conjointement sont décrites. Il s'agit de:

- mesures applicables aux opérations générant de la poussière
- mesures applicables aux zones de stockage en vrac
- systèmes de séparation/de filtres

Composés gazeux

Pour éviter les émissions de polluants atmosphériques gazeux (en particulier SO_x, NO_x, HF, HCl, COV), les mesures ou techniques primaires et secondaires suivantes sont décrites; elles sont applicables séparément ou conjointement.

- réduction de l'apport de précurseurs des polluants
- ajout d'additifs riches en calcium
- optimisation du processus
- unités de sorption (adsorbants, absorbeurs)
- postcombustion

Eaux résiduelles

Les objectifs visés et les solutions envisagées en matière de réduction des eaux résiduelles (réduction des émissions et diminution de la consommation) sont présentés sous la forme de mesures d'optimisation des procédés et de systèmes de traitement des eaux résiduelles. Ces mesures sont souvent combinées afin de réduire les rejets d'eaux résiduelles et de diminuer la consommation d'eau.

Pertes/déchets

Les objectifs visés et les solutions envisagées pour réduire les pertes/déchets du processus de fabrication sont présentés, en ce qui concerne les boues générées par la fabrication des produits céramiques et les pertes/déchets solides, et consistent en une optimisation des procédés et en mesures/techniques de recyclage et réutilisation. Ces mesures sont souvent combinées afin de réduire les pertes/déchets du processus de fabrication.

Considérations d'ordre général concernant le bruit

Des possibilités de réduction du bruit généré lors des différentes étapes du processus de fabrication des produits céramiques existent. Un récapitulatif donnant une vue d'ensemble de ces mesures de réduction des bruits est présenté.

Outils de gestion environnementale/systèmes de gestion de l'environnement

Les systèmes de gestion de l'environnement sont essentiels pour réduire au minimum les incidences environnementales des activités industrielles en général, et certaines mesures sont plus particulièrement importantes pour l'industrie céramique. Les systèmes de gestion de l'environnement sont donc présentés dans le BREF en tant qu'outils utilisables par les exploitants d'installations pour agir de manière systématique et tangible sur les aspects de la conception, de la construction, de l'entretien, de l'exploitation et du déclassement d'une installation.

MTD POUR LA FABRICATION DES CÉRAMIQUES

Le chapitre relatif aux MTD (chapitre 5) recense les techniques considérées comme MTD en général, sur la base essentiellement des informations fournies dans le chapitre 4, et compte tenu de la définition des meilleures techniques disponibles énoncée au point 11 de l'article 2, ainsi que des éléments de réflexion figurant à l'annexe IV de la directive. Comme cela est expliqué plus précisément dans la préface, le chapitre relatif aux MTD ne fixe pas de valeurs limites d'émission et n'en propose pas, mais suggère des valeurs de consommation et d'émission qui sont associées à l'utilisation de certaines MTD, et présente une sélection de MTD. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de 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 amélioration.

Les paragraphes ci-après récapitulent les principales conclusions en matière de MTD eu égard aux problèmes d'environnement les plus pertinents dans le secteur de la fabrication des céramiques. Ces conclusions sont de deux types. Le chapitre 5.1 présente des conclusions en ce qui concerne les MTD génériques, c'est-à-dire celles applicables d'une manière générale à l'ensemble de l'industrie céramique. Le chapitre 5.2 présente des conclusions plus spécifiques, c'est-à-dire applicables aux neuf grands secteurs de l'industrie céramique considérés. Les «meilleures techniques disponibles» pour une installation spécifique consistent en général à appliquer séparément ou conjointement une ou plusieurs des techniques et mesures mentionnées dans le chapitre concerné en tant que MTD génériques ou spécifiques.

Il convient de signaler que dans le présent résumé, les conclusions en matière de MTD sont également présentées de façon synthétique. Pour consulter l'intégralité des conclusions en matière de MTD, il convient de se reporter aux rubriques correspondantes du chapitre 5 du BREF.

MTD génériques

Cette partie consacrée aux MTD concerne les conclusions générales en matière de MTD qui s'appliquent aux neuf secteurs présentés en détail dans le BREF.

Il convient de signaler que dans le présent résumé, les conclusions en matière de MTD sont également présentées de façon synthétique. Rappelons également que cette synthèse sur les MTD ainsi que les niveaux d'émission associés aux MTD ne sauraient dispenser de la lecture du chapitre 4 et des conclusions intégrales concernant les MTD qui figurent au chapitre 5 du BREF.

Gestion de l'environnement:

Mettre en place et respecter un système de gestion de l'environnement présentant, le cas échéant en fonction des conditions particulières, les caractéristiques énumérées dans la partie 5.1.1 du BREF.

Consommation d'énergie:

Réduire la consommation d'énergie en combinant plusieurs des techniques qui sont énumérées dans la partie 5.1.2.a du BREF et qui peuvent se résumer ainsi:

- conception améliorée des fours et des séchoirs
- récupération de la chaleur en excès provenant des fours, en particulier au niveau de leur zone de refroidissement
- changement de combustible pour la cuisson (remplacement du fioul lourd et des combustibles solides par des combustibles produisant peu d'émissions)
- modification des pâtes céramiques.

Réduire la consommation d'énergie primaire en recourant à des unités de cogénération/production combinée de chaleur et d'électricité en fonction de la demande de chaleur utile, dans le cadre de programmes de réglementation de l'énergie économiquement viables.

Émissions diffuses de poussières:

Réduire les émissions diffuses de poussières en combinant plusieurs des techniques qui sont énumérées dans la partie 5.1.3.1 du BREF et qui peuvent se résumer en mesures applicables aux opérations générant de la poussière et en mesures applicables aux zones de stockage en vrac.

Émissions de poussières captées à la source, résultant d'opérations autres que le séchage, l'atomisation ou la cuisson:

Réduire les émissions de poussières, captées à la source, de certaines opérations en amenant la valeur moyenne demi-horaire dans une fourchette comprise entre 1 et 10 mg/m³, au moyen de filtres à manches. La limite supérieure de cette fourchette peut être plus élevée en fonction des conditions particulières d'exploitation.

Émissions de poussières provenant des procédés de séchage:

Limiter les émissions de poussières résultant des procédés de séchage de manière que la valeur journalière moyenne soit comprise entre 1 et 20 mg/m³, en nettoyant le séchoir, en évitant l'accumulation de résidus pulvérulents à l'intérieur de celui-ci et en adoptant des protocoles d'entretien adéquats.

Émissions de poussières résultant de la cuisson:

Réduire les émissions de poussières dues aux gaz d'évacuation résultant de la cuisson de manière que la valeur journalière moyenne soit comprise entre 1 et 20 mg/m³ en combinant plusieurs des techniques qui sont énumérées dans la partie 5.1.3.4 du BREF. Ces techniques peuvent se résumer en l'utilisation de combustibles peu cendreaux et en mesures visant à réduire au minimum la formation de poussières due au chargement des articles à cuire dans le four.

Le dépoussiérage des gaz d'évacuation au moyen d'un filtre sec, qui permet de parvenir à un niveau d'émission de poussières inférieur à 20 mg/m³ de gaz épuré fait partie des MTD; le recours à des adsorbants à lit fixe en cascade, permettant d'obtenir un niveau d'émission inférieur à 50 mg/m³ de gaz épuré est considéré comme MTD (pour les granulats d'argile expansée, voir les MTD spécifiques pour ce secteur).

Composés gazeux, mesures/techniques primaires:

Réduire les émissions des composés gazeux (HF, HCl, SO_x, COV, métaux lourds) présents dans les gaz d'évacuation résultant de la cuisson en appliquant séparément ou concurremment une ou plusieurs des techniques énumérées dans la partie 5.1.4.1 du BREF. En résumé, ces techniques consistent à réduire l'apport en précurseurs des polluants et à optimiser la courbe de chauffage.

Maintenir les émissions de NO_x des gaz d'évacuation du processus de cuisson au-dessous de 250 mg/m³ (valeur journalière moyenne déclarée pour NO₂) lorsque la température des gaz d'évacuation est inférieure à 1300 °C, ou au-dessous de 500 mg/m³ (valeur journalière moyenne déclarée pour NO₂) lorsque la température des gaz d'évacuation atteint ou dépasse 1300 °C, en combinant les mesures/techniques primaires énumérées dans les parties 4.3.1 et 4.3.3 du BREF (pour les granulats d'argile expansée, voir les MTD spécifiques pour ce secteur).

Maintenir les émissions de NO_x des gaz d'échappement des moteurs de cogénération au-dessous de 500 mg/m³ (valeur journalière moyenne déclarée pour NO₂) en appliquant des mesures d'optimisation du processus.

Composés gazeux, mesures/techniques secondaires associées à des mesures/techniques primaires

Réduire les émissions de composés inorganiques gazeux contenus dans les gaz d'évacuation du processus de cuisson en appliquant une ou plusieurs des techniques énumérées dans la partie 5.1.4.2 du BREF et qui peuvent se résumer en adsorbants à lit fixe en cascade et en dépoussiérage des gaz par filtre sec.

Les tableaux ci-dessous, extraits de la partie 5.1.4.2 du BREF, présentent les niveaux d'émission correspondant aux MTD pouvant être obtenus, pour les composés gazeux inorganiques présents dans les gaz d'évacuation du processus de cuisson, en combinant les mesures/techniques primaires préconisées dans la partie 5.1.4.1a et les mesures/techniques secondaires indiquées dans la partie 5.1.4.2 du BREF.

Paramètre	Unité, exprimée en valeur journalière moyenne	NEA MTD ¹⁾
Fluorure déclaré en tant que HF	mg/m ³	1 – 10 ²⁾
Chlorure déclaré en tant que HCl	mg/m ³	1 – 30 ³⁾

Résumé

SO _x déclaré en tant que SO ₂ Teneur en soufre de la matière première ≤ 0,25 %	mg/m ³	<500
SO _x déclaré en tant que SO ₂ Teneur en soufre de la matière première > 0,25 %	mg/m ³	500 – 2000 ⁴⁾
¹⁾ Les fourchettes indiquées sont fonction de la concentration de polluant (précurseur) dans les matières premières. Dans le cas de la cuisson de produits céramiques dont la matière première contient peu de substance polluante (précurseur), les valeurs inférieures de la fourchette correspondent aux MTD; lorsque la matière première à partir de laquelle le produit céramique est fabriqué a une forte teneur en substance polluante, ce sont les valeurs supérieures de la fourchette qui sont les NEA MTD (niveaux d'émission associés aux MTD).		
²⁾ Le niveau indiqué comme le niveau MTD le plus élevé peut être moins élevé, en fonction des caractéristiques de la matière première.		
³⁾ Le niveau indiqué comme le niveau MTD le plus élevé peut être moins élevé, en fonction des caractéristiques de la matière première. En outre, le NEA MTD ne doit pas empêcher la réutilisation des eaux résiduaires.		
⁴⁾ Le niveau MTD le plus élevé ne s'applique qu'aux matières premières à très forte teneur en soufre.		

Eaux résiduaires (émissions et consommation):

Réduire la consommation d'eau en appliquant, séparément ou conjointement, plusieurs des mesures d'optimisation des procédés énumérées dans la partie 4.4.5.1 du BREF.

Épurer les eaux résiduaires en appliquant, séparément ou conjointement, plusieurs des systèmes de traitement des eaux résiduaires énumérés dans la partie 4.4.5.2 du BREF, de façon que l'eau soit suffisamment propre pour être réutilisée dans le processus de fabrication ou pour être rejetée directement dans les cours d'eau ou indirectement via le réseau d'égouts municipal.

Le tableau ci-dessous, extrait de la partie 5.1.5, présente les niveaux d'émission de substances polluantes associés aux MTD dans les eaux résiduaires:

Paramètre	Unité	NEA MTD (échantillon mixte après 2 h de sédimentation)
Solides en suspension	mg/l	50,0
Composés organohalogénés adsorbables	mg/l	0,1
Plomb (Pb)	mg/l	0,3
Zinc (Zn)	mg/l	2,0
Cadmium (Cd)	mg/l	0,07

Si plus de 50 % des eaux résiduaires sont réutilisés dans le processus de fabrication, il se peut que des concentrations plus élevées de ces polluants soient encore des NEA MTD, tant que la charge du polluant en question par unité de production (kg de matière première transformée) ne dépasse pas la charge de polluant qui résulterait d'un taux de recyclage de l'eau inférieur à 50 %.

Boues:

Recycler/réutiliser les boues en appliquant des systèmes de recyclage des boues et/ou de réutilisation des boues dans d'autres produits.

Pertes/déchets solides:

Réduire les pertes/déchets solides du processus de fabrication en combinant plusieurs des techniques énumérées dans la partie 5.1.7 du BREF et qui peuvent se résumer ainsi:

- Réintroduction des matières premières non mélangées dans le processus de fabrication
- Réintroduction des articles cassés dans le processus de fabrication
- Utilisation des déchets solides par d'autres secteurs
- Commande électronique de la cuisson
- Optimisation du chargement du four.

Bruit:

Réduire le bruit en combinant plusieurs des techniques énumérées dans la partie 5.1.8 du BREF et qui peuvent se résumer ainsi:

- Confinement des unités
- Isolation des unités contre les vibrations
- Utilisation de silencieux et de ventilateurs à faible vitesse de rotation
- Localisation des fenêtres et accès et des unités bruyantes à l'écart du voisinage
- Isolation phonique des fenêtres et des murs
- Fermeture des fenêtres et portes
- Réalisation des activités (extérieures) bruyantes uniquement pendant la journée
- Bon entretien de l'installation.

MTD spécifiques

Cette partie concerne les conclusions spécifiques en matière de MTD, pour chacun des neuf secteurs présentés en détail dans le BREF. Rappelons une fois encore que cette synthèse sur les MTD ainsi que les niveaux d'émission associés aux MTD ne sauraient dispenser de la lecture du chapitre 4 et des conclusions intégrales concernant les MTD qui figurent au chapitre 5 du BREF.

Émissions de poussières captées à la source:

Carrelage mural et de sol, céramiques domestiques, sanitaires, céramiques techniques, tuyaux en grès vitrifié:

Réduire les émissions de poussières captées à la source, dues aux procédés de glaçure par pulvérisation, en amenant la valeur moyenne demi-horaire dans une fourchette comprise entre 1 et 10 mg/m³, grâce à l'application de filtres à manches ou de filtres à lamelles en matériau fritté.

Carrelage mural et de sol, céramiques domestiques, céramiques techniques:

Réduire les émissions de poussières captées à la source, dues aux procédés d'atomisation par pulvérisation, en amenant la valeur moyenne demi-horaire dans une fourchette comprise entre 1 et 50 mg/m³, grâce à l'utilisation de cyclones couplés à des dépoussiéreurs hydrauliques dans les installations existantes, si l'eau de rinçage peut être réutilisée.

Granulats d'argile expansée:

Réduire les émissions de poussières captées à la source, dues aux gaz d'évacuation chauds, en amenant la valeur journalière moyenne dans une fourchette comprise entre 5 et 50 mg/m³, au moyen de dépoussiéreurs électrostatiques ou de dépoussiéreurs humides.

Émissions de poussières dues à la cuisson:

Carrelage mural et de sol:

Réduire les émissions de poussières dues aux gaz d'évacuation résultant de la cuisson en amenant la valeur journalière moyenne dans une fourchette comprise entre 1 et 5 mg/m³, par une épuration des gaz d'évacuation au moyen d'un filtre à manche.

Composés gazeux, mesures/techniques primaires:

Briques et tuiles:

Réduire les émissions des composés gazeux (HF, HCl, SO_x,) présents dans les gaz d'évacuation résultant de la cuisson par l'ajout d'additifs riches en calcium.

Granulats d'argile expansée:

Maintenir les émissions de NO_x dues aux gaz d'évacuation des fours rotatifs au-dessous de 500 mg/m³ (valeur journalière moyenne déclarée pour NO₂) en combinant plusieurs mesures/techniques primaires.

Composés gazeux, mesures/techniques secondaires:

Carrelage mural et de sol, céramiques domestiques, sanitaires, céramiques techniques:

Réduire les émissions des composés gazeux inorganiques présents dans les gaz d'évacuation résultant de la cuisson en appliquant des modules d'adsorption, en particulier lorsque le débit des gaz d'évacuation est faible (inférieur à 18000 m³/h) et que les concentrations de composés inorganiques autres que HF (SO₂, SO₃, HCl) et de poussières des gaz bruts sont faibles.

Carrelage mural et de sol:

Réduire les émissions de HF dues aux gaz d'évacuation résultant de la cuisson en amenant la valeur journalière moyenne dans une fourchette comprise entre 1 et 5 mg/m³, par une épuration des gaz d'évacuation au moyen d'un filtre à manche, par exemple.

Composés organiques volatils:

Briques et tuiles, produits réfractaires, céramiques techniques, abrasifs agglomérés vitrifiés:

Réduire les émissions de composés organiques volatils dues aux gaz d'évacuation résultant de la cuisson (dont les concentrations dans les gaz bruts sont de l'ordre de 100 à 150 mg/m³ suivant les caractéristiques du gaz brut, c'est-à-dire composition, température) en amenant la valeur journalière moyenne déclarée en tant que C total dans une fourchette comprise entre 5 et 20 mg/m³, grâce à une postcombustion thermique dans un réacteur thermique à une ou à trois chambres.

Produits organiques réfractaires traités par des composés organiques:

Réduire les émissions de composés organiques volatils résultant du traitement par des composés organiques en utilisant des filtres à charbon actif. Pour les dégagements gazeux importants, l'application d'un système de postcombustion thermique permettant de ramener les émissions de composés organiques volatils résultant du traitement par des composés organiques à des valeurs comprises entre 5 et 20 mg/m³ fait partie des MTD.

Réutilisation des eaux résiduelles:

Carrelage mural et de sol, céramiques domestiques, sanitaires:

Réutiliser les eaux résiduelles dans le processus de fabrication avec des taux de recyclage des eaux résiduelles compris entre 50 et 100 % (pour le carrelage mural et de sol, en fonction du type de carreaux à fabriquer) ou entre 30 et 50 % (pour les céramiques domestiques et les sanitaires) en associant des mesures d'optimisation des procédés et des systèmes d'épuration des eaux résiduelles.

Réutilisation des boues:Carrelage mural et de sol:

Réutiliser les boues résultant du traitement des eaux résiduaires pour la préparation de la pâte céramique à raison de 0,4 à 1,5 % en poids de boues sèches ajoutées à la pâte céramique, en utilisant le cas échéant un système de recyclage des boues.

Pertes/déchets solides:Céramiques domestiques, sanitaires, céramiques techniques, produits réfractaires:

Réduire la quantité de pertes/déchets solides sous forme de moules en plâtre usagés ayant servi à la mise en forme, en appliquant une ou plusieurs des mesures suivantes:

- Remplacement des moules en plâtre par des moules en polymères
- Remplacement des moules en plâtre par des moules en métal
- Utilisation de malaxeurs à plâtre sous vide
- Réutilisation des moules en plâtre usagés dans d'autres secteurs.

TECHNIQUES NOUVELLES

Certaines nouvelles techniques permettant de réduire au minimum les incidences sur l'environnement sont en phase de développement ou ont un usage si limité qu'elles sont considérées comme des techniques nouvelles. Cinq d'entre elles sont examinées dans le chapitre 6:

- Brûleurs à tube radiant
- Cuisson assistée par micro-ondes et séchoirs à micro-ondes.
- Nouveau type de système de séchage pour les produits réfractaires
- Gestion avancée des eaux résiduaires avec récupération intégrée de la glaçure
- Glaçure sans plomb pour porcelaine de table de haute qualité

CONCLUSIONS

Le chapitre relatif aux conclusions contient des informations sur les grandes étapes de l'élaboration du document, sur le niveau de consensus obtenu sur les propositions de MTD dans l'industrie céramique et sur les déficits d'information qui subsistent, notamment en ce qui concerne les données qui n'ont pas été communiquées dans les délais impartis pour l'échange d'informations et qui n'ont donc pas pu être prises en considération. Il contient également des recommandations concernant les recherches complémentaires à mener et les informations à rassembler, ainsi que des recommandations pour la mise à jour du BREF sur la fabrication de la céramique.

Dans le cadre de ses programmes de RDT, la Communauté européenne mène et subventionne une série de projets concernant les technologies propres, les nouvelles techniques de recyclage et de traitement des effluents et les stratégies de gestion en la matière. Ces projets sont susceptibles d'apporter une précieuse contribution lors des futures révisions du BREF. Les lecteurs sont donc invités à informer le Bureau européen IPPC de tout résultat de recherche présentant de l'intérêt pour ce document (voir également la préface du BREF).

PREFACE

1. Statut du présent 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, comme la Directive, s'applique sans préjudice de la réglementation communautaire sur l'hygiène et la sécurité au travail.

Le présent document fait partie d'une série présentant les résultats d'un échange d'informations entre les Etats membres de l'UE et les industries intéressées au sujet des meilleures techniques disponibles (MTD), des prescriptions de contrôle y afférentes, et de leur évolution. 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 définition des MTD

Afin de clarifier le contexte juridique entourant la rédaction du présent document, la préface décrit quelques-unes des principales dispositions de la Directive IPPC et définit notamment le 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 ou de leur porter atteinte.

La Directive a pour objet la prévention et la réduction intégrées des pollutions 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 est liée aux objectifs de protection de l'environnement. 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, la Directive 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 principe général défini à l'article 3 constitue la pierre angulaire de cette approche. Il stipule que les exploitants doivent prendre toutes les mesures de prévention appropriées contre la pollution, notamment en ayant recours aux meilleures techniques disponibles, afin d'améliorer les performances en matière d'environnement.

L'expression « Meilleures Techniques Disponibles » est définie à l'article 2(11) de la Directive comme « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base de valeurs limites d'émission 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 comme suit :

les « techniques » désignent aussi bien les techniques employées 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 dans le contexte du 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 non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables ;

les « meilleures » techniques renvoient aux techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau élevé de protection 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 un cas particulier lors de la détermination des Meilleures Techniques Disponibles ... compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action 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 des autorisations sont invitées à tenir compte des principes généraux définis à l'article 3 lorsqu'elles définissent les 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. Elles ne doivent pas prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, mais tenir compte des caractéristiques techniques de l'installation considérée, 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 États 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 présent document

L'article 16(2) de la Directive invite la Commission à organiser « l'échange d'informations entre les Etats membres et les industries intéressées au sujet des meilleures techniques disponibles, des prescriptions de contrôle y afférentes et de leur évolution » et à publier les résultats de ces échanges.

L'objet de l'échange d'informations est défini au considérant 25 de la Directive, qui prévoit que « les progrès 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 Environnement) a mis en place un forum d'échange d'informations (IEF) pour faciliter les travaux entrepris en application de l'article 16(2). Un certain nombre de groupes de travail techniques ont par ailleurs été créés sous les auspices de l'IEF. L'IEF comme les groupes de travail techniques sont composés de représentants des États membres et de l'industrie, comme le prévoit l'article 16(2).

La présente série de documents a pour objet 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'information

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. Compréhension et utilisation du présent document

Les informations contenues dans le présent document sont prévues pour servir de base à la détermination des meilleures techniques disponibles dans certains cas particuliers. Lors de la détermination de ces meilleures techniques et de la fixation des conditions d'autorisation, 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.

Les paragraphes ci-après décrivent le type d'informations présentées dans chacune des sections du document.

Les chapitres 1 et 2 contiennent des informations générales sur l'industrie de la céramique et sur les processus industriels utilisés dans ce secteur. Le chapitre 3 contient des données et des informations relatives aux niveaux d'émission et de consommation actuels qui reflètent la situation dans les installations existantes au moment de la publication.

Le chapitre 4 décrit de manière plus détaillée les techniques de réduction des émissions et d'autres techniques considérées comme les plus pertinentes pour la détermination des meilleures techniques et des conditions d'autorisation. Ces informations indiquent les niveaux de consommation et d'émission qu'il est possible d'atteindre avec la technique considérée, donnent une estimation des coûts et des problèmes multimiliés posés par la technique et précisent dans quelle mesure la technique est applicable aux installations nécessitant des autorisations en matière de prévention et de réduction de la pollution, par exemple aux installations nouvelles, existantes, de petite ou de grande dimension. L'applicabilité d'une technique dans différents secteurs de l'industrie céramique est également prise en considération. Les techniques généralement considérées comme dépassées ne sont pas incluses.

Le chapitre 5 présente les techniques et les niveaux d'émission et de consommation jugés compatibles avec les meilleures techniques disponibles au sens général. Le but est ainsi d'apporter des indications générales sur les niveaux d'émission et de consommation qu'il est possible de considérer comme des valeurs de référence appropriées pour servir de base à la détermination de conditions d'autorisation reposant sur les meilleures techniques disponibles 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 valeurs limites d'émissions. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de 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 amélioration. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'incidences sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra pas les traiter tous de manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés au chapitre 5 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 transfrontières, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de 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 le présent document.

Étant 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 IPPC de l'Institut de prospective technologique, à l'adresse suivante:

Edificio Expo, c/ Inca Garcilaso, s/n, E-41092 Seville, Espagne

Téléphone : +34 95 4488 284

Fax : +34 95 4488 426

e-mail : JRC-IPTS-EIPPCB@ec.europa.eu

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

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des produits céramiques

SOMMAIRE	I
PREFACE	XI
CHAMP D'APPLICATION	XXV
1 GENERALITES SUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES	1
1.1 Origines historiques.....	1
1.2 Caractéristiques des céramiques.....	1
1.3 Répartition géographique et considérations économiques générales.....	3
1.4 Principaux problèmes environnementaux	4
1.5 Secteurs de la céramique	5
1.5.1 Briques et tuiles.....	6
1.5.2 Tuyaux en grès	7
1.5.3 Produits réfractaires	8
1.5.4 Granulats d'argile expansée.....	9
1.5.5 Carreaux pour sols et murs.....	9
1.5.6 Céramiques ornementales (céramiques domestiques).....	11
1.5.7 Appareils sanitaires	11
1.5.8 Céramiques techniques.....	12
1.5.9 Abrasifs inorganiques.....	12
2 PROCÉDES ET TECHNIQUES APPLIQUES A LA FABRICATION DES CERAMIQUES	13
2.1 Matières premières	13
2.2 Description générale du procédé de fabrication	14
2.2.1 Stockage et transport des matières premières.....	15
2.2.2 Préparation des matières premières	15
2.2.2.1 Préséchage.....	15
2.2.2.2 Pré-mélange	15
2.2.2.3 Atmosphérisation/maturation	15
2.2.2.4 Concassage primaire et secondaire, broyage et criblage	16
2.2.2.5 Broyage par voie sèche ou par voie humide.....	16
2.2.2.6 Criblage à sec/classification pneumatique	16
2.2.2.7 Séchage par atomisation.....	17
2.2.2.8 Calcination	17
2.2.2.9 Matières synthétiques de base	17
2.2.2.10 Frittes et émaux, préparation de l'émail.....	17
2.2.3 Mélange des composants.....	18

2.2.3.1	Généralités	18
2.2.3.2	Mélangeurs continus	18
2.2.3.3	Mélangeurs discontinus	18
2.2.4	Façonnage/formage des produits	19
2.2.4.1	Généralités	19
2.2.4.2	Pressage	19
2.2.4.2.1	Pressage mécanique.....	19
2.2.4.2.2	Pressage hydraulique	19
2.2.4.2.3	Pressage par impact	19
2.2.4.2.4	Pressage par friction	19
2.2.4.2.5	Pressage isostatique	20
2.2.4.3	Extrusion	20
2.2.4.4	Moulage.....	20
2.2.4.5	Coulage en barbotine	20
2.2.4.6	Coulage par fusion.....	21
2.2.5	Séchage des produits céramiques	21
2.2.5.1	Généralités	21
2.2.5.2	Séchoirs à plancher chauffant.....	21
2.2.5.3	Séchoirs à chambres (intermittents).....	21
2.2.5.4	Séchoirs tunnels (continus).....	22
2.2.5.5	Séchoirs verticaux	22
2.2.5.6	Séchoirs à rouleaux multi-étages horizontaux	22
2.2.5.7	Séchoirs déshumidificateurs	22
2.2.5.8	Séchoirs infrarouge et à micro-ondes	23
2.2.6	Traitement de surface et décoration des produits céramiques.....	23
2.2.6.1	Texturation des produits argileux	23
2.2.6.2	Revêtements appliqués	23
2.2.6.3	Emaillage, engobage et autres techniques décoratives	23
2.2.7	Cuisson	24
2.2.7.1	Objectifs de la cuisson	24
2.2.7.2	Modifications physico-chimiques lors de la cuisson	24
2.2.7.3	Fours intermittents (périodiques).....	25
2.2.7.4	Fours continus	26
2.2.7.4.1	Fours à chambre (Hoffmann)	26
2.2.7.4.2	Fours tunnels	26
2.2.7.4.3	Fours à rouleaux	27
2.2.7.4.4	Fours intermittents.....	28
2.2.7.5	Cuisson en meule.....	28
2.2.7.6	Fours rotatifs.....	28
2.2.7.7	Lits fluidisés	29

2.2.7.8	Récupération de la chaleur lors du refroidissement	29
2.2.8	Traitements ultérieurs (finition des produits)	29
2.2.8.1	Usinage (meulage, perçage, sciage)	29
2.2.8.1.1	Meulage humide.....	29
2.2.8.1.2	Meulage à sec.....	29
2.2.8.1.3	Perçage.....	29
2.2.8.1.4	Sciage.....	30
2.2.8.2	Polissage	30
2.2.8.3	Enrichissement au carbone (produits réfractaires)	30
2.2.8.4	Polissage au tonneau des briques de parement.....	30
2.2.9	Ajout de matériaux auxiliaires	31
2.2.9.1	Matériaux de jointoiement (canalisations)	31
2.2.9.2	Silicones/produits hydrofuges	31
2.2.9.3	Matériaux isolants	31
2.2.9.4	Encartage et placage (briques réfractaires)	31
2.2.9.5	Adhésifs	31
2.2.9.6	Assemblage final.....	31
2.2.10	Triage, conditionnement et stockage.....	31
2.2.11	Installations d'alimentation et d'évacuation (traitement des effluents gazeux et traitement des eaux de process)	32
2.2.12	Le recyclage dans l'industrie céramique.....	32
2.2.13	Organigramme général montrant différents chemins de traitement	33
2.3	Description des techniques de fabrication des produits céramiques secteur par secteur	34
2.3.1	Briques et tuiles.....	34
2.3.1.1	Matières premières.....	35
2.3.1.2	Préparation des matières premières.....	39
2.3.1.3	Façonnage	40
2.3.1.4	Séchage, émaillage et engobage.....	41
2.3.1.5	Cuisson.....	41
2.3.1.6	Traitements ultérieurs	43
2.3.1.7	Flux d'entrée et de sortie en briqueterie et en tuilerie.....	43
2.3.2	Tuyaux en grès	44
2.3.2.1	Matières premières.....	45
2.3.2.2	Préparation des matières premières.....	47
2.3.2.3	Façonnage	47
2.3.2.4	Séchage et émaillage	47
2.3.2.5	Cuisson.....	47
2.3.2.6	Traitements ultérieurs	48
2.3.2.7	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des tuyaux en grès.....	48

2.3.3	Produits réfractaires	49
2.3.3.1	Matières premières	50
2.3.3.2	Préparation des matières premières	51
2.3.3.3	Façonnage.....	51
2.3.3.4	Séchage.....	52
2.3.3.5	Cuisson	52
2.3.3.6	Traitements ultérieurs	53
2.3.3.7	Opérations spéciales	53
2.3.3.8	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des produits réfractaires	54
2.3.4	Granulats d'argile expansée	54
2.3.4.1	Matières premières, additifs et agents auxiliaires	56
2.3.4.2	Système global et technologie du procédé.....	57
2.3.4.2.1	Façonnage.....	57
2.3.4.2.2	Technologie du procédé thermique	57
2.3.4.2.3	Réaction chimique pendant la dilatation.....	58
2.3.4.2.4	Criblage et concassage ultérieurs	58
2.3.4.3	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des granulats d'argile expansée	58
2.3.5	Carreaux pour sols et murs	59
2.3.5.1	Matières premières	60
2.3.5.2	Préparation des matières premières	61
2.3.5.3	Façonnage.....	61
2.3.5.4	Séchage.....	62
2.3.5.5	Cuisson et émaillage.....	62
2.3.5.6	Traitements ultérieurs	63
2.3.5.7	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des carreaux pour sols et murs.....	63
2.3.6	Céramiques ornementales (céramiques domestiques)	64
2.3.6.1	Matières premières	65
2.3.6.2	Préparation des matières premières	65
2.3.6.3	Façonnage.....	66
2.3.6.4	Séchage.....	67
2.3.6.5	Cuisson, émaillage et décoration	67
2.3.6.6	Traitements ultérieurs	70
2.3.6.7	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques domestiques	70
2.3.7	Appareils sanitaires.....	71
2.3.7.1	Matières premières	71
2.3.7.2	Préparation des matières premières	72
2.3.7.3	Façonnage.....	72
2.3.7.4	Séchage et émaillage	72
2.3.7.5	Cuisson	73

2.3.7.6	Traitements ultérieurs	74
2.3.7.7	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des appareils sanitaires	74
2.3.8	Céramiques techniques.....	71
2.3.8.1	Matières premières.....	76
2.3.8.2	Préparation des matières premières.....	77
2.3.8.3	Façonnage	78
2.3.8.4	Usinage	79
2.3.8.5	Emaillage, engobage et métallisation.....	80
2.3.8.6	Séchage, cuisson et précuisson	81
2.3.8.7	Cuisson/Frittage	82
2.3.8.8	Traitements ultérieurs	83
2.3.8.9	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques techniques.....	83
2.3.9	Abrasifs inorganiques.....	84
2.3.9.1	Matières premières.....	84
2.3.9.2	Préparation des matières premières.....	84
2.3.9.3	Façonnage	85
2.3.9.4	Séchage	85
2.3.9.5	Cuisson.....	85
2.3.9.6	Traitements ultérieurs	85
2.3.9.7	Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des abrasifs inorganiques	85
3	NIVEAUX D'EMISSION ET DE CONSOMMATION COURANTS	88
3.1	Emissions – considérations générales.....	88
3.1.1	Emissions dans l'air	88
3.1.1.1	Poussière (particules)	88
3.1.1.2	Emissions gazeuses	88
3.1.1.2.1	Dioxyde de soufre et autres composés de soufre	88
3.1.1.2.2	Oxydes d'azote et autres composés de l'azote	89
3.1.1.2.3	Monoxyde de carbone (et dioxyde de carbone)	89
3.1.1.2.4	Composés organiques volatils (COV).....	89
3.1.1.2.5	Les métaux et leurs composés.....	89
3.1.1.2.6	Le chlore et ses composés.....	89
3.1.1.2.7	Le fluor et ses composés	90
3.1.2	Emissions dans l'eau.....	90
3.1.3	Déchets de production.....	91
3.1.4	Emissions de bruit.....	91
3.1.5	Sources d'émission et voies d'émission possibles.....	92
3.2	Consommation – considérations générales.....	93
3.2.1	Consommation d'énergie.....	93
3.2.2	Consommation d'eau	93

3.2.3	Consommation de matières premières	93
3.3	Présentation des données d'émission et de consommation.....	94
3.3.1	Briques et tuiles	94
3.3.1.1	Données d'émission	94
3.3.1.2	Données de consommation	104
3.3.2	Tuyaux en grès.....	107
3.3.2.1	Données d'émission	107
3.3.2.2	Données de consommation	108
3.3.3	Produits réfractaires	109
3.3.3.1	Données d'émission	109
3.3.3.2	Données de consommation	111
3.3.4	Granulats d'argile expansée.....	113
3.3.4.1	Données d'émission	113
3.3.4.2	Données de consommation	115
3.3.5	Carreaux pour sols et murs	116
3.3.5.1	Données d'émission	116
3.3.5.2	Données de consommation	121
3.3.6	Céramiques ornementales (céramiques domestiques)	122
3.3.6.1	Données d'émission	122
3.3.6.2	Données de consommation	123
3.3.7	Appareils sanitaires.....	124
3.3.7.1	Données d'émission	122
3.3.7.2	Données de consommation	125
3.3.8	Céramiques techniques	126
3.3.8.1	Données d'émission	126
3.3.8.2	Données de consommation	130
3.3.9	Abrasifs inorganiques	139
3.3.9.1	Données d'émission	139
3.3.9.2	Données de consommation	141
4	TECHNIQUES A PRENDRE EN COMPTE LORS DE LA DETERMINATION DES MTD POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES	142
4.1	Réduction des consommations d'énergie (efficacité énergétique)	142
4.1.1	Conception améliorée des fours et des séchoirs.....	142
4.1.2	Récupération de la chaleur résiduelle des fours.....	144
4.1.3	Cogénération/centrales mixtes thermiques et électriques	145
4.1.4	Remplacement du fioul lourd et des combustibles solides par des combustibles peu polluants.....	147
4.1.5	Modification des pâtes céramiques.....	148
4.2	Emissions de poussières (particules).....	150
4.2.1	Mesures pour les opérations génératrices de poussières	150

4.2.2	Mesures pour les zones de stockage en vrac	150
4.2.3	Systèmes de séparation/filtration.....	151
4.2.3.1	Séparateurs centrifuges	151
4.2.3.2	Filtres à manches.....	151
4.2.3.3	Filtres lamellaires frittés.....	154
4.2.3.4	Dépoussiéreurs humides.....	150
4.2.3.5	Électrofiltres (EF)	151
4.3	Composés gazeux	162
4.3.1	Réduction de l'apport de précurseurs de polluants	162
4.3.2	Ajout d'additifs riches en calcium	163
4.3.3	Optimisation des procédés	166
4.3.3.1	Optimisation de la courbe de chauffage	167
4.3.3.2	Réduction des niveaux de vapeur d'eau dans les gaz de four	169
4.3.3.3	Combustion interne des gaz de carbonisation	169
4.3.3.4	Brûleurs bas NO _x	171
4.3.4	Installations de sorption (adsorbours, absorbeurs)	171
4.3.4.1	Adsorbours à lit à garnissage de type cascade.....	171
4.3.4.2	Systèmes d'adsorption modulaires	171
4.3.4.3	Épuration des gaz résiduaires par voie sèche avec un filtre (filtre à manches ou électrofiltre)	172
4.3.4.4	Épuration des gaz résiduaires par voie humide	172
4.3.4.5	Filtres à charbon actif.....	173
4.3.4.6	Laveurs biologiques	173
4.3.5	Postcombustion	173
4.3.5.1	Postcombustion thermique	175
4.3.5.2	Postcombustion catalytique.....	178
4.3.6	Exemples de données opérationnelles, d'efficacités, de consommations et de données sur les coûts pour différentes techniques d'épuration des effluents gazeux	180
4.4	Eaux de process.....	184
4.4.1	L'eau utilisée comme matière première.....	184
4.4.2	L'eau utilisée comme véhicule d'échange de chaleur	184
4.4.3	L'eau utilisée comme agent d'épuration.....	184
4.4.4	L'eau utilisée comme agent de nettoyage	184
4.4.5	Objectifs et solutions pour la réduction des eaux de process (émissions et consommations).....	184
4.4.5.1	Optimisation des procédés	185
4.4.5.2	Systèmes de traitement des eaux de process	186
4.5	Déchets de production	189
4.5.1	Boues issues de la fabrication des produits céramiques	189

4.5.1.1	Systèmes de recyclage des boues	189
4.5.1.2	Réutilisation des boues dans d'autres produits.....	190
4.5.2	Déchets de production solides	191
4.5.2.1	Considérations générales relatives à la réutilisation des déchets de production solides en tant que matières premières	191
4.5.2.2	Considérations générales sur les moules en plâtre, les auxiliaires de cuisson et les déchets de casse - les éviter/les remplacer/les réduire	192
4.6	Considérations générales relatives au bruit.....	194
4.7	Outils de management environnemental	195
5	MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES.....	205
5.1	Meilleures techniques disponibles génériques	205
5.1.1	Management environnemental.....	205
5.1.2	Consommation d'énergie	206
5.1.3	Emissions de poussières	207
5.1.3.1	Emissions diffuses de poussières.....	207
5.1.3.2	Emissions canalisées de poussières dues à des opérations génératrices de poussières	207
5.1.3.3	Emissions de poussières dues aux procédés de séchage	207
5.1.3.4	Emissions de poussières dues aux procédés de cuisson.....	207
5.1.4	Composés gazeux	208
5.1.4.1	Mesures/techniques primaires	208
5.1.4.2	Mesures/techniques secondaires et combinées avec des mesures/techniques primaires	208
5.1.5	Eaux de process (émissions et consommation).....	209
5.1.6	Boues	210
5.1.7	Déchets de production solides	210
5.1.8	Bruit.....	210
5.2	Meilleures techniques disponibles spécifiques à un secteur	211
5.2.1	Briques et tuiles	211
5.2.1.1	Composés gazeux/techniques/mesures primaires	211
5.2.1.2	Composés organiques volatils	211
5.2.2	Tuyaux en grès.....	211
5.2.2.1	Emissions canalisées de poussières	211
5.2.3	Produits réfractaires	211
5.2.3.1	Composés organiques volatils	211
5.2.3.2	Déchets de production solides	212
5.2.4	Granulats d'argile expansée	212
5.2.4.1	Emissions canalisées de poussières	212
5.2.4.2	Composés gazeux/mesures/techniques primaires	212
5.2.5	Carreaux pour sols et murs	212

5.2.5.1	Emissions canalisées de poussières.....	212
5.2.5.2	Emissions de poussières dues aux procédés de cuisson	212
5.2.5.3	Composés gazeux/mesures/techniques secondaires	213
5.2.5.4	Réutilisation des eaux de process.....	213
5.2.5.5	Réutilisation des boues.....	213
5.2.6	Céramiques ornementales (céramiques domestiques).....	213
5.2.6.1	Emissions canalisées de poussières.....	213
5.2.6.2	Composés gazeux/techniques/mesures secondaires	213
5.2.6.3	Réutilisation des eaux de process.....	213
5.2.6.4	Déchets de production solides	214
5.2.7	Appareils sanitaires	214
5.2.7.1	Emissions canalisées de poussières.....	214
5.2.7.2	Composés gazeux/techniques/mesures secondaires	214
5.2.7.3	Réutilisation des eaux de process.....	214
5.2.7.4	Déchets de production solides.....	214
5.2.8	Céramiques techniques.....	214
5.2.8.1	Emissions canalisées de poussières.....	214
5.2.8.2	Composés gazeux/techniques/mesures secondaires	215
5.2.8.3	Composés organiques volatils.....	215
5.2.8.4	Déchets de production solides.....	215
5.2.9	Abrasifs inorganiques.....	215
5.2.9.1	Composés organiques volatils.....	217
6	TECHNIQUES EMERGENTES POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES...	220
6.1	Brûleurs à tube radiant	220
6.2	Cuisson assistée par micro-ondes dans des séchoirs à micro-ondes.....	220
6.3	Nouveau type de système de séchage pour les produits réfractaires	221
6.4	Gestion avancée des eaux de process avec récupération intégrée de l'émail	221
6.5	Emailage sans plomb des porcelaines de table haut de gamme.....	221
7	REMARQUES FINALES	220
8	REFERENCES.....	223
9	GLOSSAIRE	229

Liste des figures

Figure 1.1 : Etapes de la fabrication d'un produit céramique	2
Figure 2.1 : Plages de températures industrielles de maturation de différents groupes de produits ..	25
Figure 2.2 : Coupe transversale d'un four intermittent	26
Figure 2.3 : Vue schématique d'un four tunnel.....	27
Figure 2.4 : Coupe transversale d'un four tunnel avec wagonnet	27
Figure 2.5 : Coupe transversale d'un four à rouleaux	28
Figure 2.6 : Organigramme général montrant différentes voies de traitement	33
Figure 2.7 : Vue schématique de la fabrication des tuiles pressées	34
Figure 2.8 : Vue schématique de la préparation des briques extrudées dans la fabrication des briques de maçonnerie.....	35
Figure 2.9 : Distribution de la teneur en fluorure dans les argiles italiennes.....	37
Figure 2.10 : Distribution de la teneur en chlore dans les argiles italiennes.....	38
Figure 2.11 : Distribution de la teneur en soufre dans les argiles italiennes.....	38
Figure 2.12 : Teneur en soufre des argiles.....	39
Figure 2.13 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des briques et des tuiles	44
Figure 2.14 : Vue schématique de la fabrication des tuyaux en grès.....	45
Figure 2.15 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des tuyaux en grès	49
Figure 2.16 : Vue schématique de la fabrication de briques basiques contenant du minerai de chrome	50
Figure 2.17 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des produits réfractaires.....	54
Figure 2.18 : Vue schématique de la fabrication des granulats d'argile expansée	55
Figure 2.19 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des granulats d'argile expansée.....	59
Figure 2.20 : Vue schématique de la fabrication des carreaux pour sols et murs	60
Figure 2.21 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des carreaux pour sols et murs.....	63
Figure 2.22 : Vue schématique de la fabrication de la porcelaine de table.....	64
Figure 2.23 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques domestiques.....	70
Figure 2.24 : Vue schématique de la fabrication des appareils sanitaires	71
Figure 2.25 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des appareils sanitaires	74
Figure 2.26 : Vue schématique d'un procédé de fabrication d'isolants électriques.....	75
Figure 2.27 : Vue schématique d'un procédé de fabrication de catalyseurs céramiques.....	76
Figure 2.28 : Usinage vert, blanc et dur dans la fabrication des céramiques techniques.....	80
Figure 2.29 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques techniques.....	83
Figure 2.30 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des abrasifs inorganiques.....	86
Figure 3.1 : Distribution du fluor rejeté dans l'industrie italienne des briques et des tuiles	97
Figure 3.2 : Distribution du chlorure rejeté dans l'industrie italienne des briques et des tuiles.....	97
Figure 3.3 : Emissions de SO _x en Allemagne, au Royaume-Uni et en Belgique	98
Figure 3.4 : Exemple de débit massique pour la fabrication de briques	106
Figure 3.5 : Exemple de débit massique pour la fabrication de tuyaux en grès.....	109
Figure 3.6 : Exemple de débit massique pour la fabrication de briques en périclase-chromite.....	112

Figure 3.7 : Exemple de débit massique pour la fabrication de vaisselle	130
Figure 3.8 : Exemple de débit massique pour la fabrication d'appareils sanitaires	135
Figure 4.1 : Vue schématique d'un exemple de système mixte de recyclage de la chaleur	145
Figure 4.2 : Vue schématique de la génération d'air chaud au moyen d'un moteur à gaz de cogénération	147
Figure 4.3 : Vue schématique d'un filtre à manches avec régénération par impulsion de pression ..	155
Figure 4.4 : Exemples des coûts d'investissement compris dans les coûts annuels des installations de filtration, à l'exclusion de l'installation et des manches de dépoussiérage.....	156
Figure 4.5 : Vue schématique d'un filtre lamellaire fritté rigide	157
Figure 4.6 : Plages de température d'un exemple de courbe de température pour le rejet de polluants lors de la cuisson de briques	167
Figure 4.7 : Vue schématique de la combustion interne des gaz de carbonisation	169
Figure 4.8 : Illustration d'un adsorbant de type cascade à écoulement transversal.....	171
Figure 4.9 : Schéma de procédé d'un adsorbant à lit à garnissage de type cascade avec tambour d'exfoliation	172
Figure 4.10 : Vue schématique d'un système d'adsorption modulaire alvéolaire.....	175
Figure 4.11 : Vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches	176
Figure 4.12 : Vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un électrofiltre	177
Figure 4.13 : Illustration d'une unité d'épuration des effluents gazeux par voie humide	179
Figure 4.14 : Vue schématique d'un système de postcombustion thermique situé dans un thermoréacteur (système à trois chambres)	184
Figure 4.15 : Transfert des effluents gazeux dans un système externe de postcombustion thermique	184
Figure 4.16 : Schéma de traitement d'une station d'épuration des eaux de process	188
Figure 4.17 : Vue schématique d'une installation de recyclage des boues.....	190

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Statistiques sur la production, le chiffre d'affaires et les emplois dans l'industrie céramique	3
Tableau 1.2 : Consommations énergétiques spécifiques dans l'industrie céramique européenne	4
Tableau 1.3 : Part des combustibles utilisés en Allemagne en 1998 par secteur	5
Tableau 1.4 : L'industrie des tuyaux en grès en Europe	7
Tableau 1.5 : Fabrication de produits réfractaires dans l'Europe des quinze en 2001/2002	8
Tableau 1.6 : Classification simplifiée des carreaux céramiques	10
Tableau 1.7 : Consommation énergétique par Etat membre (consommation énergétique spécifique en TJ pour 1000 tonnes produites)	10
Tableau 1.8 : Volume de production de vaisselle et d'objets décoratifs	11
Tableau 2.1 : Gammes des compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses utilisées dans l'industrie de la brique et de la tuile dans différents pays européens	36
Tableau 2.2 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels.....	42
Tableau 2.3 : Comparaison entre les fours tunnels classiques et les méthodes de cuisson rapide (en tuilerie).....	42
Tableau 2.4 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels à cuisson rapide	42
Tableau 2.5 : Composition minéralogique de l'argile dans la fabrication des tuyaux en grès	46
Tableau 2.6 : Composition chimique de l'argile dans la fabrication des tuyaux en grès	46
Tableau 2.7 : Plages de paramètres de fonctionnement des fours tunnels.....	48
Tableau 2.8 : Oxydes les plus utilisés dans les opérations de fonte/coulage	51
Tableau 2.9 : Paramètres de fonctionnement des séchoirs à fonctionnement périodique (séchoirs à chambres).....	52
Tableau 2.10 : Paramètres de fonctionnement de deux séchoirs tunnels et d'un séchoir à atmosphère contrôlée	52
Tableau 2.11 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels utilisés dans l'industrie réfractaire	53
Tableau 2.12 : Paramètres de fonctionnement des fours intermittents	53
Tableau 2.13 : Exemples d'additifs et d'agents auxiliaires favorisant la dilatation.....	56
Tableau 2.14 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels et des fours à rouleaux.....	62
Tableau 2.15 : Gammes types de la composition minéralogique des matières premières pour la fabrication des céramiques domestiques.....	65
Tableau 2.16 : Gammes types de la composition chimique des matières premières pour la fabrication des céramiques domestiques.....	65
Tableau 2.17 : Paramètres de fonctionnement d'un four intermittent.....	68
Tableau 2.18 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels.....	68
Tableau 2.19 : Paramètres de fonctionnement pour la décoration sur émail	69
Tableau 2.20 : Paramètres de fonctionnement pour la décoration dans et sous émail.....	69
Tableau 2.21 : Paramètres de fonctionnement des séchoirs à fonctionnement périodique (séchoirs à chambres).....	73
Tableau 2.22 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels.....	73
Tableau 2.23 : Paramètres de fonctionnement des fours intermittents	73
Tableau 2.24 : Températures de frittage des céramiques techniques.....	82

Tableau 3.1 : Aperçu des sources d'émission et voies d'émission possibles dans l'industrie de la céramique	92
Tableau 3.2 : Plages d'émission des effluents gazeux bruts issus du procédé de cuisson de la fabrication des briques et tuiles	96
Tableau 3.3 : Données opérationnelles de gaz brut avec divers combustibles.....	98
Tableau 3.4 : Valeurs de gaz brut avec divers agents de formation de pores.....	99
Tableau 3.5 : Concentrations moyennes des gaz épurés (blocs d'argile poreux) et facteurs d'émission relatifs au produit correspondants	99
Tableau 3.6 : Concentrations des gaz épurés pour des usines de briques	100
Tableau 3.7 : Concentrations des gaz épurés pour des usines de briques clinker et des usines de tuiles	101
Tableau 3.8 : Valeurs d'émission de gaz bruts et de gaz épurés dans la fabrication de blocs d'argile	102
Tableau 3.9 : Valeurs d'émission de gaz bruts et de gaz épurés dans la fabrication de briques de parement	103
Tableau 3.10 : Données de consommation d'énergie par tonne de produit provenant des installations pour la fabrication de briques et de tuiles.....	104
Tableau 3.11 : Consommation d'énergie spécifique dans l'industrie des briques et des tuiles.....	105
Tableau 3.12 : Concentration maximale en gaz épuré dans la fabrication de tuyaux en grès	107
Tableau 3.13 : Consommation d'énergie spécifique dans la fabrication de tuyaux en grès	108
Tableau 3.14 : Valeurs de gaz brut de différents produits réfractaires.....	110
Tableau 3.15 : Emissions provenant des fours pour les produits réfractaires non basiques.....	110
Tableau 3.16 : Valeurs de gaz brut pour procédures spéciales	110
Tableau 3.17 : Données de consommation d'énergie pour la fabrication de briques réfractaires magnésiennes par kg de produit	111
Tableau 3.18 : Plages de valeurs d'émission de poussière issues d'un concassage primaire en aval d'un séparateur à couche filtrante.....	113
Tableau 3.19 : Plages de valeurs d'émission réelles issues d'un meulage à sec en aval du système de filtrage respectif.....	113
Tableau 3.20 : Plages de valeurs d'émissions de poussière issues de la granulation en aval d'un séparateur à couche filtrante.....	114
Tableau 3.21 : Plages de valeurs d'émissions issues de procédés de cuisson en aval des systèmes de filtrage respectifs	114
Tableau 3.22 : Valeurs d'émission de poussière d'unités de criblage.....	114
Tableau 3.23 : Valeurs d'effluents de laveur humide	113
Tableau 3.24 : Mélange de matières premières dans la production de granulats en argile expansée	113
Tableau 3.25 : Données opérationnelles et valeurs de gaz brut d'unités de séchage par atomisation	115
Tableau 3.26 : Données opérationnelles et valeurs de gaz brut de séchoir	119
Tableau 3.27 : Données opérationnelles et valeurs de gaz brut pendant la cuisson	119
Tableau 3.28 : Emissions gazeuses issues des différentes phases des procédés de fabrication de carreaux pour sols et murs. Facteurs d'émission de polluants pour émissions non-contrôlées (NC) et contrôlées (C).....	120
Tableau 3.29 : Analyse chimique des eaux de process non traitées.....	121
Tableau 3.30 : Plages des principaux composants chimiques de la boue (fabrication de carreaux pour sols et murs.....	121

Tableau 3.31 : Exemples de besoins en énergie spécifiques de différents fours	122
Tableau 3.32 : Comparaison de la consommation spécifique d'énergie thermique et d'énergie électrique par étape de procédé	122
Tableau 3.33 : Données opérationnelles et valeurs d'émission de poussière de gaz épurés d'un processus de séchage par atomisation	124
Tableau 3.34 : Valeurs de gaz bruts et données opérationnelles dans une cuisson de céramiques domestiques	125
Tableau 3.35 : Valeurs de gaz bruts et épurés d'un procédé de cuisson unique de céramiques domestiques	125
Tableau 3.36 : Systèmes de pigments céramiques utilisés pour couleurs de décoration	127
Tableau 3.37 : Concentrations de métaux lourds dans le gaz brut de cuisson de décoration	127
Tableau 3.38 : Analyse des eaux de process d'un fabricant de vaisselle en porcelaine	128
Tableau 3.39 : Analyse des eaux de process d'une usine de céramiques domestiques	128
Tableau 3.40 : Données de consommation d'énergie thermique et électrique d'un fabricant de vaisselle en porcelaine	129
Tableau 3.41 : Exemple de compositions de gaz bruts et épurés issues d'un four tunnel	131
Tableau 3.42 : Concentrations en gaz bruts de fours tunnel et intermittent	131
Tableau 3.43 : Exemples de concentrations de gaz épurés de deux fabriques d'appareils sanitaires	132
Tableau 3.44 : Concentrations en polluants des eaux de process épurées	132
Tableau 3.45 : Données opérationnelles et rendement de différents fours	134
Tableau 3.46 : Données de consommation d'énergie	134
Tableau 3.47 : Concentrations de gaz brut dans la cuisson d'isolants électriques	136
Tableau 3.48 : Concentrations d'effluents gazeux issus d'un four intermittent pendant la cuisson d'isolants électriques	136
Tableau 3.49 : Concentrations dans les eaux de process épurées provenant d'un fabricant d'isolants électriques	137
Tableau 3.50 : Concentrations dans les eaux de process provenant d'un fabricant d'isolants électriques après floculation	137
Tableau 3.51 : Concentrations dans les eaux de process épurées provenant d'un fabricant de produits piézocéramiques	131
Tableau 3.52 : Données de consommation d'énergie provenant de deux fabriques de porcelaine électrique	138
Tableau 3.53 : Compositions de matière première pour la fabrication de porcelaine électrique	139
Tableau 3.54 : Exemples de valeurs d'effluents gazeux provenant de trois fabriques dans lesquelles sont fabriqués des abrasifs inorganiques	140
Tableau 3.55 : Données de consommation d'énergie globale de trois fabricants d'abrasifs inorganiques	145
Tableau 3.56 : Données de consommation de matière première de trois fabricants d'abrasifs inorganiques	145
Tableau 4.1 : Détail des informations relatives à chacune des techniques décrites au présent chapitre	142
Tableau 4.2 : Exemples de résistance à une température et prix des filtres à manches	156
Tableau 4.3 : Exemples de données opérationnelles pour un dépoussiérage par filtres en média filtrant	156
Tableau 4.4 : Données opérationnelles et de coût pour des électrofiltres	161

Tableau 4.5 : Paramètres techniques, efficacités, consommations et données sur les coûts pour des techniques d'épuration des effluents gazeux	187
Tableau 4.6 : Efficacités de réduction considérées par rapport à la teneur en soufre de la matière première.....	188
Tableau 4.7 : Coûts relatifs à la réduction des poussières, des composés inorganiques gazeux et des composés organiques gazeux par différentes techniques de réduction.....	183
Tableau 4.8 : Taux de recyclage des eaux de process réalisables dans différents secteurs de l'industrie céramique.....	186
Tableau 5.1 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux des procédés de cuisson au four	211
Tableau 5.2 : Niveaux d'émission de polluants associés aux MTD dans les rejets d'eaux usées	211
Tableau 7.1 : Calendrier des travaux réalisés sur le BREF relatif à la fabrication des céramiques ..	226

CHAMP D'APPLICATION

Le présent document traite des activités industrielles indiquées à la section 3.5 de l'annexe I de la Directive 96/61/CE, à savoir :

« 3.5 Installations destinées à la fabrication de produits céramiques par cuisson, notamment de tuiles, de briques, de pierres réfractaires, de carrelages, de grès ou de porcelaines, avec une capacité de production supérieure à 75 tonnes par jour, et/ou une capacité de four de plus de 4 m³ et de plus de 300 kg/m³ par four. »

Aux fins du présent document, les activités industrielles qui répondent à cette description sont regroupées sous le terme « industrie céramique ».

Les différents secteurs de l'industrie céramique recouvrent un vaste éventail de matières premières et de techniques de fabrication, mais tous ces secteurs comportent une sélection d'argiles ou d'autres matières principalement inorganiques qui sont traitées, puis séchées et cuites. Les principaux secteurs reposant sur des produits céramiques (la céramique) manufacturés sont les suivants :

- les carreaux pour sols et murs
- les briques et les tuiles
- la céramiques ornementales (céramiques domestiques)
- les produits réfractaires
- les appareils sanitaires
- les céramiques techniques
- les tuyaux en grès
- les granulats d'argile expansée
- les abrasifs inorganiques.

Outre les activités de base liées à la fabrication, le présent document couvre les activités directement associées qui sont susceptibles d'avoir une incidence sur les émissions ou sur la pollution. Ainsi, le présent document inclut les activités qui vont de la préparation des matières premières à l'acheminement des produits finis. Certaines activités ne sont pas considérées comme étant directement liées à l'activité principale et de ce fait, ne sont pas couvertes. C'est le cas, notamment, de l'extraction des matières premières. Les activités couvertes sont les suivantes :

- la sélection et la préparation des matières premières - principalement à base d'argiles et/ou d'autres minéraux inorganiques
- le façonnage des produits - généralement à partir de matières premières à l'état plastique
- le séchage des articles et éventuellement leur revêtement
- la cuisson au four pour obtenir la vitrification
- les traitements ultérieurs et le conditionnement.

1. GENERALITES SUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES

1.1 Origines historiques

Le terme « céramique » est dérivé du mot grec « keramos » qui signifie « terre cuite » et s'emploie pour désigner les matières utilisées dans l'industrie de la poterie. Des études récentes révèlent que la transformation de l'argile a connu ses débuts vers 19000 av. J.C. Les poteries les plus anciennes, découvertes au Japon, sont datées entre 8000 et 9000 av. J.C. En 4000 av. J.C., la brique cuite servait déjà à la construction de temples, de palais et de fortifications. Il y a plus de deux mille ans, les Romains ont répandu la technique de la briqueterie dans de vastes régions de l'Europe. En Egypte, on utilisait des plaques céramiques émaillées comme décorations murales pour les pyramides et en Chine, l'art de la porcelaine était connu dès 1000 av. J.C.

1.2 Caractéristiques des céramiques

En général, le terme « céramique » (produits céramiques) s'emploie pour désigner des matières inorganiques (éventuellement avec une certaine teneur en substances organiques), constituées de composés non métalliques et ayant subi un procédé de cuisson qui leur confère des propriétés définitives. Outre les matières à base d'argile, les céramiques actuelles comprennent une multitude de produits dont la teneur en argile est très faible, voire nulle. Une céramique peut être émaillée ou non émaillée, poreuse ou vitrifiée.

La cuisson d'une pâte céramique induit une transformation temps-température de ses composants minéraux, qui aboutit généralement à un mélange de nouveaux minéraux et de phases vitreuses. Les propriétés caractéristiques des produits céramiques sont leur haute résistance, leur résistance à l'usure, leur longue durée de vie, leur inertie chimique et leur absence de toxicité, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance électrique (en général) et parfois même, une porosité spécifique.

Les principales étapes de fabrication d'un produit céramique ne dépendent globalement ni des matières utilisées, ni du produit final. La figure ci-après présente de façon schématique le procédé généralement employé, ainsi que les systèmes d'alimentation et d'évacuation possibles ou nécessaires. Ce procédé se compose des étapes suivantes : extraction des matières premières et transport jusqu'à l'usine de céramique (ni l'une ni l'autre de ces étapes n'étant traitée par le présent document), stockage des matières premières, préparation des matières premières, façonnage, séchage, traitement de surface, cuisson et traitement ultérieur [23, TWG Ceramics, 2005].

Mining of raw materials and transport to ceramic plant	Extraction des matières premières et transport jusqu'à l'usine céramique
Electric power	Energie électrique
Auxiliary agents	Agents auxiliaires
Raw materials	Matières premières
Water	Eau
Sorption agents	Agents de sorption
Storage of raw materials in ceramic plant and internal transport	Stockage des matières premières à l'usine céramique et transport interne
Preparation of raw materials	Préparation des matières premières
Production of moulds	Fabrication des moules
Shaping	Façonnage
Flue gas cleaning, dedusting	Epuration, dépoussiérage des effluents gazeux
Noise	Bruit
Emissions to air	Emissions atmosphériques
Drying	Séchage
Recycling	Recyclage
Waste	Déchets
Colour	Couleur
Base	Base
Frits	Frittes
Glaze preparation	Préparation de l'émail
Surface treatment	Traitement de surface
Water treatment	Traitement de l'eau
Waste water	Eaux usées
Firing auxiliaries	Auxiliaires de cuisson
Fuels	Combustibles
Storage of fuels	Stockage des combustibles
Firing	Cuisson
Subsequent treatment	Traitement ultérieur
Re-use for raw materials preparation	Réutilisation pour la préparation des matières premières
Determination of BAT	Détermination des MTD
Product	Produit

Figure 1.1 : Etapes de la fabrication d'un produit céramique

Les meilleures techniques disponibles pour la protection intégrée de l'environnement dans l'industrie céramique qui sont mentionnées dans le présent document concernent les procédés employés dans la zone encadrée.

1.3 Répartition géographique et considérations économiques générales

Les matières premières à base d'argile sont largement répandues en Europe, de sorte que des produits céramiques comme les briques, qui sont relativement bon marché (mais qui entraînent des coûts de transport élevés en raison de leur poids) sont fabriqués dans la quasi-totalité des Etats membres. Les traditions en matière de construction et les considérations de patrimoine font que les tailles unitaires diffèrent d'un pays à l'autre. Les produits plus spécialisés, qui impliquent des prix plus élevés, sont principalement fabriqués dans les quelques pays qui détiennent les matières premières spéciales requises et, chose tout aussi importante, qui possèdent des traditions de savoir-faire et d'expertise. Par exemple, la plupart des carreaux céramiques sont fabriqués en Italie et en Espagne ; la porcelaine de table, au Royaume-Uni, en Allemagne et en France ; les tuyaux en grès, en Allemagne, au Royaume-Uni, en Belgique et aux Pays-Bas.

Il existe à l'échelle mondiale d'importants échanges commerciaux dans les domaines des carreaux pour sols et murs, des produits réfractaires, de la vaisselle et des objets décoratifs, des céramiques techniques, des tuyaux en grès et des appareils sanitaires.

L'importance de l'industrie céramique en termes d'emploi et d'économie est présentée au tableau suivant [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Secteur de l'industrie céramique	Production 2000 EU-15 (en millions de tonnes)	Chiffre d'affaires 2003 EU-15 (en millions d'euros)	Emplois 2003 (en milliers)
Carreaux pour sols et murs	25,0	10100	69
Briques et tuiles	55,0	6800	50
Céramiques ornementales	0,5	2000	48
Produits réfractaires	4,5	3100	18
Appareils sanitaires	0,5	1900	25
Céramiques techniques	0,15	2000	9
Tuyaux en grès	0,7	300	2
Granulats d'argile expansée (2002)	3,0	300	2,5
Abrasifs inorganiques (2003)	0,04	260	3,1

Tableau 1.1 : Statistiques sur la production, le chiffre d'affaires et les emplois dans l'industrie céramique

1.4 PRINCIPAUX PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX

En fonction des procédés de production spécifiquement utilisés, les usines de fabrication de produits céramiques provoquent des émissions dans l'air, dans l'eau et dans le sol (déchets). En outre, les bruits et les odeurs désagréables peuvent nuire à l'environnement. Les types et les quantités de pollution atmosphérique, de déchets et d'eaux usées dépendent de différents paramètres. Ces paramètres sont, par exemple, les matières premières exploitées, les agents auxiliaires employés, les combustibles utilisés et les méthodes de production :

- émissions dans l'air : des particules/poussières peuvent apparaître lors de la manutention ou de la transformation des matières premières ou de la finition des produits, de même que la combustion de fioul ou de différents combustibles solides peut engendrer la formation de suie. Les émissions gazeuses se produisent lors de la cuisson ou du séchage par atomisation des céramiques et peuvent provenir des matières premières et/ou des combustibles employés. Parmi ces émissions gazeuses, celles des oxydes de carbone, des oxydes d'azote, des oxydes de soufre, des composés fluorés et chlorés inorganiques, ainsi que des composés organiques sont particulièrement importantes. L'utilisation à des fins décoratives de substances contenant des métaux lourds, ou celle de fioul lourd comme combustible, peut également engendrer des émissions de métaux lourds
- émissions dans l'eau : celles-ci ont lieu principalement au cours des procédés de fabrication des produits céramiques, notamment lors de la fabrication des céramiques traditionnelles, et les eaux usées industrielles qui en résultent contiennent principalement des composants minéraux (matières particulaires insolubles). Selon la méthode de production employée, les eaux de process peuvent contenir d'autres matières inorganiques, de faibles quantités de nombreuses matières organiques, ainsi que certains métaux lourds. Outre les eaux de process, qui sont souvent épurées et réutilisées en circuit fermé, l'eau de refroidissement, les eaux pluviales et les eaux usées sanitaires peuvent contribuer aux émissions dans l'eau provoquées par l'usine
- les déchets de production : les déchets engendrés par la fabrication des produits céramiques sont essentiellement constitués des matières suivantes :
 - différents types de boues (boues issues du traitement des eaux de process, boues d'émaillage, boues de plâtre, boues de broyage)
 - déchets de casse du façonnage, du séchage, de la cuisson et des réfractaires
 - poussières des unités d'épuration et de dépoussiérage des effluents gazeux
 - moules en plâtre usagés
 - agents de sorption usés (calcaire granulé, poussière de calcaire)
 - déchets d'emballage (plastique, bois, métal, papier etc.)
 - résidus solides, notamment les cendres, issus de la cuisson avec des combustibles solides.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'installation, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont expédiées hors de l'usine pour servir à d'autres industries ou sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets.

- consommation d'énergie/émissions de CO₂ : tous les secteurs de l'industrie céramique sont des secteurs à haute intensité énergétique, l'un des éléments clés du procédé étant le séchage suivi d'une cuisson à des températures comprises entre 800 et 2000 °C. Pour la fabrication de la porcelaine, l'énergie compte pour moins de 10 à 18 % du total des coûts. Pour la briqueterie, la part des coûts énergétiques varie entre 17 et 25 %, les niveaux maxima pouvant atteindre 30 %.

Le tableau ci-après montre les consommations énergétiques spécifiques dans l'industrie céramique européenne [30, TWG Ceramics, 2005] :

Secteur	Unité	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Briques et tuiles	GJ/t	2,65	2,45	2,19	2,06	2,38	2,31
Carreaux pour sols et murs	GJ/t	11,78	9,16	6,76	5,45	5,74	5,60
Produits réfractaires	GJ/t	4,88	4,96	6,51	4,91	5,41	5,57
Appareils sanitaires	GJ/t	26,56	24,214	22,27	22,76	20,88	21,87
Tuyaux en grès	GJ/t			5,75	5,77	6,1	5,23
Céramiques ornementales	GJ/t			47,56	38,91	43,46	45,18
Céramiques techniques	GJ/t					34,72	50,39

Tableau 1.2 : Consommations énergétiques spécifiques dans l'industrie céramique européenne

Aujourd'hui, le gaz de pétrole liquéfié (propane et butane) et le fioul EL sont principalement utilisés pour la cuisson, tandis que le fioul lourd, le gaz naturel liquéfié (GNL), le biogaz/la biomasse, l'électricité et les combustibles solides (ex. le charbon, le coke de pétrole) ont également un rôle à jouer en tant que sources d'énergie pour les brûleurs. L'utilisation du fioul lourd, du charbon et du coke de pétrole se limite principalement à la briqueterie.

Dans le tableau ci-après, la part des différents combustibles dans la consommation totale de combustibles (sans électricité) en Allemagne est indiquée en fonction des différents secteurs [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Secteur	Gaz naturel (%)	Fioul EL (%)	Fioul lourd (%)	Autres (%)
Céramiques domestiques	98,0	1,6	-	0,4
Appareils sanitaires	97,7	2,3	-	-
Céramiques techniques	96,2	3,6	-	0,2
Produits réfractaires	90,2	7,3	0,1	2,4
Carreaux pour sols et murs	98,1	1,1	0,8	-
Briques et tuiles	88,6	5,3	5,3	0,8
Tuyaux en grès	100	-	-	-
Granulats d'argile expansée ¹⁾	-	-	-	-
Abrasifs inorganiques ²⁾	90,6	9,4	-	-
¹⁾ données non disponibles				
²⁾ estimations du VDI (Verein Deutscher Ingenieure : association des ingénieurs allemands) pour l'Allemagne				

Tableau 1.3 : Part des combustibles utilisés en Allemagne en 1998

1.5 Secteurs de la céramique

Les méthodes et les étapes fondamentales des procédés de fabrication ne diffèrent que très légèrement dans la fabrication des différents produits céramiques en dehors du fait que pour la fabrication, par exemple, des carreaux pour sol et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs (céramiques domestiques), des appareils sanitaires, ainsi que des céramiques techniques, on emploie souvent un procédé de cuisson en plusieurs étapes. C'est l'une des raisons pour lesquelles les différents secteurs de la céramique se classent traditionnellement en deux groupes : le groupe de la céramique « grossière » ou « de construction » qui comprend les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée et le groupe de la « céramique fine » ou de la « céramique traditionnelle et industrielle », qui regroupe les secteurs des carreaux pour sols et murs, des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques.

Le mode de réalisation technique peut être toutefois extrêmement différent, selon les critères spécifiques des produits et les caractéristiques des matières premières utilisées. Par exemple, il existe différents fours à fonctionnement continu (ex. les fours tunnels) et à fonctionnement périodique (par ex. les fours intermittents) qui servent à la cuisson d'un même produit céramique ou de produits différents.

Les produits de l'industrie céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » diffèrent de ceux de l'industrie céramique « grossière » ou « de construction » principalement dans leur texture. La frontière entre l'industrie céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » et l'industrie céramique « grossière » ou « de construction » varie entre des diamètres particuliers équivalents à 0,1 et à 0,2 mm. Les produits de céramique « grossière » ou « de construction » présentent une inhomogénéité de plus de 0,2 mm, mais la frontière entre la céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » et la céramique « grossière » ou « de construction » n'est pas réellement fixée à l'heure actuelle. Ainsi, c'est la technologie de transformation de la céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » qui est utilisée pour fabriquer les produits super-réfractaires. Par conséquent, le présent document ne reprend pas la distinction faite entre les deux groupes qui est mentionnée ci-dessus, mais se borne à distinguer les neuf secteurs suivants des produits céramiques [32, TWG Ceramics, 2006] :

- les briques et les tuiles
- les tuyaux en grès
- les produits réfractaires
- les granulats d'argile expansée
- les carreaux pour sols et murs
- la céramiques ornementales (céramiques domestiques)
- les appareils sanitaires
- les céramiques techniques
- les abrasifs inorganiques.

1.5.1 Briques et tuiles

Les produits en brique sont fabriqués dans des quantités importantes et servent de matériaux dans de nombreuses branches du bâtiment et de la construction. Le plus souvent, les briques et les tuiles ont une appellation qui désigne non pas la technique de façonnage utilisée, mais l'usage auquel elles sont destinées :

- les briques de construction (ex. blocs d'argile, briques de parement, briques hollandaises (de qualité « clinker ») et briques légères)
- les tuiles (ex. tuiles extrudées, tuiles pressées)
- les briques de pavage
- les briques de cheminée (ex. conduits de cheminée).

En raison de ces différentes techniques de fabrication, différents types de briqueteries se sont spécialisés dans différents groupes de produits, p. ex. les fabriques de tuiles en argile et les usines de briques de construction.

En 2003, l'industrie européenne de la brique et de la tuile en argile avait un chiffre d'affaires global d'environ 6800 millions d'euros et employait environ 50000 personnes [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

Il existe des différences quant au nombre d'usines de briques en argile, de briqueteries de pavage et de tuileries, et notamment les suivantes :

c'est l'Italie qui détient le plus grand nombre d'usines, soit 238 installations ; viennent ensuite l'Allemagne (183), le Portugal (150), la France (136) et le Royaume-Uni (134). Moins de 70 usines sont en exploitation dans d'autres pays comme les Pays-Bas (58), la Belgique (40), l'Autriche (30), la Suisse (27) et le Danemark (26).

Le nombre moyen de briqueteries par million d'habitants est le suivant :

Portugal (1,5), Danemark (5,1), Italie (4,1), Belgique (4,0), Autriche (3,8), Suisse (3,7), Pays-Bas (3,7), Royaume-Uni (2,3), France (2,3) et Allemagne (2,2).

Une comparaison des données [3, CERAME-UNIE, 2003] relatives aux habitants des pays suivants (situation en 2001) indique que :

- la production de tuiles est élevée en France (0,89 m² par habitant), suivie de l'Italie (0,61), de l'Allemagne (0,54), de l'Espagne (0,5), de la Suisse (0,48), du Danemark (0,4) et de l'Autriche (0,28). Dans d'autres pays, comme le Royaume-Uni et la Belgique, la production de tuiles est nettement inférieure. La Finlande et la Norvège ne sont pas productrices de tuiles
- les briques et les blocs sont fabriqués dans chaque pays de l'Europe des 15. Le niveau de production le plus élevé est enregistré en Belgique (0,29 m² par habitant), suivie de l'Espagne (0,28), de l'Italie (0,26), de l'Autriche (0,24), de l'Allemagne (0,17) et de la Suisse (0,08), avec des valeurs inférieures dans les autres pays.

Les blocs perforés occupent une place importante notamment en Autriche (97 %) et en Allemagne (87 %) ; les briques de parement, aux Pays-Bas (94 %), au Royaume-Uni (82 %) et au Danemark (85%). Les blocs creux sont privilégiés en France (63 %) et en Italie (62 %).

Le nombre moyen d'employés par usine varie entre les différents Etats européens :

- Royaume-Uni (66)
- Belgique (44)
- France (39) et Pays-Bas (38)
- Autriche (35), Allemagne (34) et Italie (34)
- Suisse (24) et Danemark (21).

1.5.2 Tuyaux en grès

Les tuyaux et raccords en grès sont utilisés pour les canaux de drainage et les égouts, mais aussi pour les réservoirs à acides et pour les produits destinés aux bâtiments pour animaux. En 2000, la production annuelle de l'Europe des 15 se montait à 708000 tonnes [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001].

Les usines de fabrication sont situées en Belgique, en Allemagne, en Italie, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. Leurs produits sont livrés dans la totalité des 15 Etats membres de l'UE sur la base d'une norme européenne, la norme EN 295, qui a été ratifiée en 1991 et qui est depuis entrée en vigueur dans tous les Etats membres de l'Union européenne des 15 et de l'AELE, ainsi que dans d'autres Etats membres associés au CEN.

Dans le présent document, le terme « tuyaux » englobe les raccords qui doivent être assemblés pour former une canalisation destinée à transporter les eaux usées et enterrée dans le sol.

Le tableau suivant présente des statistiques générales sur l'industrie des tuyaux en grès en Europe, pour l'année 2000 [3, CERAME-UNIE, 2003], [30, TWG Ceramics, 2005].

Pays	BE	DE	IT	NL	UK	EU-15
Nombre d'habitants (10 ⁶)	10	82	57,5	15,7	58,5	
Nombre d'usines*)	1	8	1	2	5	17
Chiffre d'affaires annuel des tuyaux et raccords (en tonnes)	115000	208000	74000	102000	209000	708000
Nombre total de salariés	250	500	150	213	800	1913
Nombre moyen de salariés par usine	377	115	207	107	220	166

*) Une même usine peut exploiter plusieurs fours

Tableau 1.4 : L'industrie des tuyaux en grès en Europe

1.5.3 Produits réfractaires

Les produits réfractaires sont des céramiques capables de résister à des températures supérieures à 1500 °C. De nombreux produits réfractaires se présentant sous des formes et des aspects extrêmement variés s'utilisent dans un grand nombre d'applications industrielles dans l'industrie de l'acier, du fer, du ciment, de la chaux, du verre, de la céramique, de l'aluminium, du cuivre et de la pétrochimie, dans les incinérateurs, les générateurs et les systèmes de chauffage domestique, notamment les blocs de chauffage à accumulation nocturne. Ils sont indispensables aux procédés à haute température et résistent à tous types de contraintes (mécaniques, thermiques, chimiques) tels que l'érosion, la déformation par fluage, la corrosion et les chocs thermiques.

La résistance des éléments réfractaires aux températures élevées est définie de telle sorte que leur point de ramollissement ne soit pas inférieur à 1500 °C. On emploie généralement une classification qui distingue les « produits réfractaires », dont le point de ramollissement est entre 1500 et 1800 °C, des « produits hautement réfractaires », dont le point de ramollissement est supérieur à 1800 °C [23, CERAME-UNIE, 2005].

Initialement fondée sur l'utilisation d'argiles d'une plus grande pureté comme matières premières, la fabrication des réfractaires repose aujourd'hui sur l'emploi de matières premières extrêmement diverses et qui peuvent être naturelles ou synthétiques. Nombre d'entre elles sont importées de pays extérieurs à l'Europe.

La demande en produits réfractaires est étroitement liée aux niveaux de production et d'investissement des pays consommateurs. Ainsi, la quantité de produits réfractaires consommée par tonne de produits manufacturés tels que l'acier ou le ciment a considérablement diminué ces dix dernières années en raison des innovations techniques et des procédés. La durée de vie plus longue des revêtements des fours de fabrication de l'acier ou des poches de coulée, ainsi que des délais de réparation ou d'entretien plus courts ont permis d'améliorer de façon notable la productivité des industries qui en font usage.

Les produits réfractaires s'utilisent généralement dans les industries les plus consommatrices d'énergie, comme la métallurgie, l'industrie cimentière, la pétrochimie et l'industrie verrière. La qualité du revêtement des fours étant de prime importance pour l'efficacité énergétique de leurs procédés, l'industrie réfractaire a un impact considérable sur l'efficacité énergétique de ces industries. L'amélioration continue des produits réfractaires permet - grâce à une meilleure isolation et à une durée de vie plus longue du revêtement - une diminution de la consommation énergétique spécifique par les opérations des industries consommatrices.

La fabrication des produits réfractaires dans l'Europe des quinze est la plus importante à l'échelle mondiale, avec, en 2001, un volume total de production de 4,6 millions de tonnes (l'industrie allemande se situant en tête, avec un volume total de production estimé à 1,5 millions de tonnes), correspondant à environ 3300 millions d'euros en 2002. Environ 65 % de ce chiffre concerne la production de fer et d'acier ; de 5 à 8 %, la production de ciment, de verre et de céramique et le reste, la métallurgie non ferreuse, la production chimique, pétrochimique, énergétique et l'incinération. En 2002, l'industrie de l'Europe des quinze employait 18505 personnes [20, CERAME-UNIE, 2004], [12, CTCV, 2004].

Le tableau suivant présente l'industrie des produits réfractaires dans l'Europe des quinze pour l'année 2001/2002 [20, CERAME-UNIE, 2004], [21, Almeida, 2004].

Pays	Production totale 2002 (10 ³ tonnes)
Autriche (2001)	710
Benelux	n.d.
France	524
Allemagne	931
Grèce (2001)	33
Italie	556
Pays nordiques (2001)	147
Portugal	23
Espagne	417
Royaume-Uni	204

Tableau 1.5 : Fabrication de produits réfractaires dans l'Europe des quinze en 2001/2002

1.5.4 Granulats d'argile expansée

Les granulats d'argile expansée sont des produits céramiques poreux qui ont une structure poreuse uniforme composée de fines cellules fermées et sont dotés d'une enveloppe externe ferme et densément frittée. Ils sont fabriqués à partir de matières premières contenant des minéraux argileux. La matière première est préparée, moulée puis soumise à un procédé de cuisson à des températures comprises entre 1100 et 1300 °C, ce qui provoque une augmentation importante du volume par dilatation.

Ces produits peuvent être fabriqués dans n'importe quelle quantité et avec une granulométrie et des caractéristiques qui peuvent être réglés avec précision pour satisfaire à des exigences techniques extrêmement variées dans de nombreux domaines d'application.

Ils s'utilisent comme matériau meuble ou comme matériau lié par ciment dans l'industrie de la construction (notamment pour les remblais lâches, le béton léger, les blocs et autres éléments en béton léger préfabriqué, le béton léger structural pour les traitements in situ) et également comme matériau meuble pour l'aménagement paysager (ex. les remblais dans la construction des routes, les supports pour toits verts, les remblais filtrants et drainants).

La gamme diversifiée des granulats légers industriels (LWA) recouvre un large spectre de caractéristiques techniques. Des propriétés telles que la granularité, la porosité, le poids et la résistance des grains peuvent être contrôlées au cours des procédés de fabrication. Il existe des granulats d'une densité de grain comprise entre 0,15 et 1,7 kg/dm³ qui peuvent convenir à toutes sortes d'exigences et d'applications. Ces granulats légers possèdent d'excellentes propriétés isolantes, grâce au nombre important de pores finement répartis à l'intérieur de la matière. Les valeurs de conductivité thermique pour les remblais meubles en granulats légers industriels varient de 0,07 à 0,18 W/(mK), selon la granularité et la densité de la matière en question. La granulométrie normalisée est décrite dans les normes EN 13055 - 1 et EN 13055 - 2.

Outre les granulats d'argile expansée, les granulats légers industriels comprennent également l'ardoise et le schiste expansés, les mâchefers, les cendres frittées et le verre expansé, mais le présent document ne traite pas de ces autres groupes de produits.

Des fabricants de granulats d'argile expansée se trouvent au Danemark, en Allemagne, en Suède, en Norvège, en Finlande, en Estonie, en Belgique, en Autriche, en Pologne, en Espagne, en Italie, au Portugal et en République Tchèque. Dans le centre et l'est de l'Europe, l'argile expansée porte généralement le nom de « keramzit ». La capacité industrielle européenne totale est estimée à environ 10 millions de mètres cubes.

1.5.5 Carreaux pour sols et murs

Les carreaux céramiques (voir EN 14411) sont des dalles minces faites d'argiles et/ou d'autres matières inorganiques et généralement utilisées pour recouvrir des sols et des murs. Les carreaux céramiques sont usuellement façonnés par extrusion ou par pressage à sec à température ambiante, puis séchés et enfin cuits à des températures suffisantes pour développer les propriétés requises.

Les formes de carreaux les plus répandues sont le carré et le rectangle, mais on trouve également d'autres formes polygonales (hexagone, octogone etc.). Quant aux dimensions, elles vont de quelques centimètres de côté (mosaïques) à des dalles de 60 à 100 cm de côté. L'épaisseur varie d'environ 5 mm pour du carrelage mural à plus de 25 mm pour certains carreaux extrudés.

Il existe sur le marché plusieurs types de carreaux céramiques : façonnés par pressage à sec ou par extrusion ; à pâte poreuse, compacte ou vitrifiée ; à pâte blanche (blanchâtre) ou colorée (rougeâtre) ; émaillés ou non émaillés.

Les types de carreaux céramiques fabriqués dans les Etats membres sont similaires ; certaines de leurs caractéristiques diffèrent toutefois pour des raisons culturelles, formelles, fonctionnelles, commerciales ou techniques. Par conséquent, il est difficile d'établir une équivalence entre les différents types de produits et leurs appellations dans les différents Etats membres.

Pour résoudre cette difficulté, une classification générale des carreaux céramiques a été adoptée dans une normalisation européenne et internationale. Selon la norme EN 14411, les carreaux céramiques sont divisés en neuf groupes, selon leur méthode de fabrication (méthode de façonnage) et leur absorption d'eau. L'absorption d'eau est liée à la porosité de la matière : une absorption d'eau élevée signifie une porosité élevée, tandis qu'une faible absorption d'eau est associée à une structure compacte et vitrifiée.

Cette classification est considérée comme référence générale au sein du présent document. Toutefois, les neuf groupes indiqués ne reflètent aucune différence importante en ce qui concerne les aspects environnementaux dont traite le présent document. Par conséquent, aux fins précises du présent document, ce sont les classifications simplifiées suivantes, illustrées au tableau ci-après, qui seront utilisées [3, CERAME-UNIE, 2003]. Certains carreaux céramiques ne sont pas pris en compte dans cette classification, car ils représentent globalement une part tout à fait mineure du fait que leur procédé de fabrication et leurs caractéristiques sont extrêmement différents et qu'on ne dispose d'aucune information significative ou utile concernant ces produits.

Classe	Description/Spécification
A	Carreaux extrudés
B Ia	Carreaux pressés à sec, à pâte imperméable
B Ib-B II	Carreaux pressés à sec, à pâte compacte
B III	Carreaux pressés à sec, à pâte poreuse

Tableau 1.6 : Classification simplifiée des carreaux céramiques

Les carreaux céramiques pour sols et murs sont d'importants produits de revêtement pour sols et murs qui sont utilisés dans l'industrie du bâtiment et du logement et par conséquent, le marché de l'entretien et de la rénovation présente un intérêt particulier pour ces produits. Comme autres applications, on peut citer, par exemple, l'emploi de carreaux pour les façades extérieures, les piscines et les espaces publics.

L'industrie européenne vend des carreaux dans le monde entier, et elle est de loin le plus gros exportateur. Un quart de la production européenne est exporté vers des pays situés en dehors de l'Europe des quinze : l'industrie européenne représente à elle seule les trois quarts du marché mondial des carreaux céramiques. En 2001, elle a vendu près de 1400 millions de m² de carreaux, pour une valeur totale de 10000 millions d'euros. Cette même année, l'industrie a employé environ 71000 personnes [3, CERAME-UNIE, 2003]. Une part importante de l'industrie se concentre dans deux régions : la région de Sassuolo, en Italie (Emilie-Romagne) et de Castellón, en Espagne (communauté de Valence).

Pour fabriquer des carreaux, on utilise des argiles hautement raffinées, qui peuvent le plus souvent s'obtenir au sein même de l'Europe. On utilise, en outre, diverses substances pour l'émail. L'énergie peut être considérée elle aussi comme une matière première, puisqu'elle transforme les argiles en céramique par cuisson. Les sources énergétiques utilisées sont principalement le gaz naturel et l'électricité.

Le tableau ci-après montre les consommations énergétiques par Etat membre [20, CERAME-UNIE, 2004], [21, Almeida, 2004].

Pays	1980	1990	1997	2001
DE				7,58
EL	11,61	8,68	8,1	
ES	15,78	7,00	5,49	5,78
FR	6,97	5,84	5,71	6,42
IT	11,22	6,19	5,12	5,48
NL	10,94	8,46	8,76	
PT			6,20	6,00
UK	18,05	13,15	11,33	

Tableau 1.7 : Consommation énergétique par Etat membre (consommation énergétique spécifique en TJ pour 1000 tonnes produites)

1.5.6 Céramiques ornementales (céramiques domestiques)

La fabrication des céramiques domestiques englobe la vaisselle, les objets artificiels et de fantaisie en porcelaine, en faïence et en grès fin. Les produits types sont les assiettes, les plats, les tasses, les coupes, les carafes et les vases.

Le volume total de production est faible par rapport à celui des autres grands produits de céramique industrielle, voir tableau 1.1. La vaisselle de table et les objets décoratifs ont un rapport entre la valeur et la masse complètement différent.

La vaisselle de table et les objets décoratifs répondent à la description générale des procédés qui s'appliquent à toutes les céramiques. Le tableau suivant récapitule les volumes de production des différents articles [20, CERAME-UNIE, 2004], [21, Almeida, 2004].

Pays	Articles	Tonnes par an
Allemagne	Vaisselle en porcelaine autre vaisselle objets décoratifs	69000 4000 estimation 500
Luxembourg	Total vaisselle	5370
Pays-Bas	Vaisselle (faïence, porcelaine, vaisselle vitrifiée pour l'hôtellerie) objets décoratifs	5500 250
Portugal	Total céramiques ornementales	90000
Royaume-Uni (2001)	Total céramiques ornementales	86000

Tableau 1.8 : Volume de production de vaisselle et d'objets décoratifs

1.5.7 Appareils sanitaires

Les produits en céramique utilisés à des fins sanitaires sont tous regroupés sous l'appellation collective de « appareils sanitaires ». Des produits céramiques types sont les cuvettes de WC, les bidets, les lavabos, les citernes et les bornes-fontaines. Ces produits sont principalement en porcelaine vitreuse (imitation de porcelaine) ou en faïence.

Le volume total de production est faible par rapport à celui des autres grands produits de céramique industrielle comme les briques ou les produits réfractaires, voir tableau 1.1. Les sanitaires ont un rapport entre la valeur et la masse complètement différent de celui des briques ou des produits réfractaires.

La fabrication des appareils sanitaires se fait selon des procédés similaires à ceux qu'on applique à tous les autres produits céramiques. Les matières premières sont malaxées avec de l'eau pour produire une barbotine ayant les caractéristiques requises. Cette barbotine est ensuite stockée dans des réservoirs et utilisée pour le coulage de barbotine dans des moules séparés ou dans des machines de coulage sous pression. Le produit est fabriqué directement par les machines de coulage sous pression ou est dégagé des moules employés pour le coulage de barbotine. Les pièces doivent être séchées avant de pouvoir être travaillées ou transportées.

L'émail est appliqué directement sur la surface de l'argile et cuit à une température appropriée pour le produit en question ; normalement, entre environ 1200 et 1210 °C pour la porcelaine vitreuse et à environ 1220 °C pour l'argile réfractaire.

La pulvérisation de l'émail donne à la forme sous-jacente sa couleur et son éclat. Pour obtenir la couleur ou les combinaisons de couleurs souhaitées, on associe des pigments à l'émail. La plupart de ces pigments sont des oxydes métalliques. La quantité de pigment utilisée est minime par rapport à la masse des matières premières (argiles) et des autres éléments constitutifs.

Le produit fini est déposé dans un entrepôt ou une zone de stockage pour être sélectionné, expédié et distribué.

1.5.8 Céramiques techniques

Les fabricants européens de céramiques techniques produisent une gamme extrêmement variée de produits qui sont au moins en partie à base d'argile, mais également à base d'autres matières premières synthétiques. Comme dans les autres secteurs céramiques, on fait cuire les matières premières dans des fours, en utilisant principalement le gaz naturel mais également l'électricité (2003 : environ 2/3 gaz et 1/3 électricité) dans le procédé.

Les céramiques techniques s'utilisent dans de nombreuses industries et concernent à la fois les produits établis, comme les isolants, et les nouvelles applications. Elles fournissent des éléments pour les industries aérospatiale et automobile (pièces de moteur, supports de catalyseurs), électronique (condensateurs, piézoélectriques), pour les produits biomédicaux (remplacement osseux), pour la protection de l'environnement (filtres) et pour beaucoup d'autres domaines.

Les principaux fabricants de céramiques techniques se trouvent en Allemagne, au Royaume-Uni, en France et aux Pays-Bas.

Du fait de la forte valeur ajoutée de certains produits de céramique technique, certains secteurs de cette industrie sont moins gourmands en énergie que d'autres secteurs par rapport à leur chiffre d'affaires. Rapportée à la masse, leur consommation d'énergie est comparable. En 2001, le niveau total de chiffre d'affaires de l'industrie européenne était estimé à 2500 millions d'euros. Bien qu'on ne dispose pas de données précises sur la production totale en volume, en 2003, les estimations se situaient à environ 0,15 millions de tonnes pour l'ensemble de l'industrie européenne [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

1.5.9 Abrasifs inorganiques

Une des caractéristiques principales du broyage - l'un des procédés de fabrication les plus anciens qui soient connus - est l'effet de nombreuses matières coupantes non orientées dans la pièce. Les produits abrasifs qui appliquent cette caractéristique principale sont des outils couramment utilisés pour travailler toutes sortes de matières : non seulement pour le broyage, mais aussi pour le tronçonnage, le polissage, le dressage, l'affûtage etc. de métaux, plastiques, bois, verre, pierres etc.

À la base, une distinction peut être établie entre les abrasifs liés (« meules ») et les abrasifs appliqués (« papier et tissus abrasifs »). Il existe, en outre, des abrasifs à l'état libre, qui ne présentent aucune liaison solide avec un support (ex. les pâtes d'abrasion). Le présent document traite uniquement des « abrasifs inorganiques », sous-groupe des abrasifs liés.

Un abrasif inorganique (ou « meule vitrifiée », comme l'appellent les fabricants) est un outil dans lequel un abrasif synthétique - les matières abrasives actuelles sont des aluminosilicates fondus spéciaux, du corindon synthétique, du carbure de silicium, du nitrure de bore cubique (CBN) ou du diamant, préalablement tamisés pour une granulométrie uniforme - est mélangé à un liant vitrifié (le rapport normal en poids est de neuf parts d'abrasif pour une part de pâte).

Le produit est ensuite cuit à une température à laquelle la pâte (p. ex. le verre, l'argile) qui constitue l'élément de liaison se vitrifie et, après avoir refroidi, lie entre eux les grains abrasifs [14, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

2. PROCEDES ET TECHNIQUES APPLIQUES A LA FABRICATION DES CERAMIQUES

2.1 Matières premières

L'industrie céramique emploie des matières extrêmement variées pour s'adapter à la diversité de sa gamme de produits. Elle utilise à la fois des matières naturelles et des matières synthétiques, nombre d'entre elles étant fabriquées en Europe mais certaines étant importées. Les besoins ne sont pas les mêmes d'un secteur à un autre et ces matières premières sont recensées de façon détaillée dans les chapitres relatifs aux différents secteurs.

Les formules (ou pâtes) des céramiques à base d'argile peuvent être constituées d'une seule argile ou de plusieurs, mélangées avec des modificateurs minéraux, dits « non plastiques », tels que la poudre de quartz et le feldspath.

Les minéraux argileux ordinaires (dits « argiles plastiques ») sont des silicates d'aluminium hydratés qui proviennent de l'érosion des roches, et la plupart des trames minérales argileuses s'articulent autour de deux unités structurales. La première est la « plaquette de silice » formée de tétraèdres constitués d'un Si^{4+} entouré de quatre ions d'oxygène. La seconde unité structurale est la « plaquette d'hydroxyde d'aluminium ou de gibbsite » constituée d'octaèdres dans lesquels un ion Al^{3+} est entouré de six groupes hydroxyles. Ces plaquettes octaédriques se condensent avec les plaquettes de silice pour former ces minéraux argileux.

Il existe plusieurs espèces minérales portant le nom de minéraux argileux, les plus importantes étant la « kaolinite », $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la « montmorillonite », $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et l'« halloysite », $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [8, Ullmann's, 2001], [11, Shreve, 1945].

Les produits céramiques avancés, qui ne comportent qu'une faible quantité d'argile, voire pas du tout, reposent sur les matières suivantes : oxydes, carbures, nitrures et borures de Al, Mg, Mn, Ni, Si, Ti, W, Zr et autres ions métalliques. Comme exemples types, on peut citer Al_2O_3 (l'alumine), MgO (la périclase ou magnésie calcinée), SiC (le carbure de silicium), TiN (le nitrure de titane) et WB_2 (le borure de tungstène) [8, Ullmann's, 2001].

Les argiles ou matières argilifères (argiles sédimentaires, argile schisteuse, argile limoneuse, marne) servent principalement à la fabrication des briques, des tuiles et des tuyaux en grès. On peut leur ajouter des additifs organiques (sciure de bois, substances à base de liant-papier, polystyrène formé) ou des agents auxiliaires inorganiques tels que le kieselguhr ou la perlite, pour obtenir un volume poreux plus important. Dans l'industrie de la brique de parement ou de la tuile, on peut ajouter des oxydes métalliques tels que MnO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , des chromites et des minéraux tels que CaCO_3 , CaMgCO_3 pour obtenir la couleur souhaitée et/ou pour améliorer la porosité du produit fini. L'ajout de BaCO_3 permet de réduire les efflorescences. Ces additifs peuvent être ajoutés soit juste avant le façonnage, soit lors de la préparation des matières premières, sous forme solide ou liquide.

Les produits réfractaires sont constitués d'argile, de chamotte (argile plastique brute calcinée et broyée) et de certaines roches naturelles telles que la quartzite, la dolomite, la bauxite et la magnésite, mais également des matières synthétiques susmentionnées, par exemple le corindon fritté, le carbure de silicium ou les spinelles. Afin de produire des masses compressibles, on ajoute des liants et des granulats aux matières premières broyées.

L'industrie de l'argile expansée utilise des argiles ayant une capacité de dilatation spécifique. Les additifs (p. ex. les fondants, les auxiliaires de dilatation et les agents de démoulage) sont utilisés pour favoriser la dilatation [26, UBA, 2005].

Les produits manufacturés par l'industrie des carreaux pour sols et murs, de la céramique domestique et des appareils sanitaires sont principalement constitués de silicates d'aluminium et les minéraux argileux servent de matières premières plastiques. En revanche, les céramiques techniques et les abrasifs inorganiques ne contiennent souvent qu'une faible quantité d'argile, voire pas du tout dans le cas des céramiques techniques, et sont donc constitués des borures, carbures, oxydes et nitrures métalliques susmentionnés.

Le quartz, le feldspath, la craie dans certains cas, la dolomite, la wollastonite et la stéatite sont employés comme charges et comme agents fondants. Divers produits céramiques sont émaillés ou engobés sur la partie visible ou sur la totalité de leur surface, avec un émail fritté ou un engobe.

Outre les matières premières et agents auxiliaires susmentionnés, il faut également d'autres agents auxiliaires, auxiliaires de cuisson, combustibles et agents de sorption pour fabriquer des céramiques. Des additifs et des liants à base de barbotine organique sont employés comme agents auxiliaires lors du façonnage. Les auxiliaires de cuisson sont des capsules, des plaques et supports réutilisables et ignifugés. Des agents de sorption tels que le carbonate de calcium, l'hydroxyde de calcium et la craie fine sont employés lors du traitement des effluents gazeux.

2.2 Description générale du procédé de fabrication

La fabrication des produits céramiques s'effectue dans différents types de fours, à partir d'un vaste éventail de matières premières et dans des formes, dimensions et couleurs extrêmement nombreuses. Le procédé global de fabrication d'un produit céramique est toutefois relativement uniforme, en dehors du fait que la fabrication des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs (céramiques domestiques), des appareils sanitaires et des céramiques techniques passe fréquemment par un procédé de cuisson en plusieurs étapes.

En général, les matières premières sont mélangées et coulées, pressées ou extrudées pour prendre forme. On emploie régulièrement de l'eau pour bien les malaxer et les façonner. Cette eau s'évapore dans des séchoirs et les produits sont placés dans le four soit manuellement (c'est le cas notamment des fours intermittents) soit ils sont placés sur des wagons qui sont acheminés à travers des fours continus. Dans la plupart des cas, les fours sont chauffés au gaz naturel, mais on utilise également le gaz de pétrole liquéfié, le fioul, le charbon, le coke de pétrole, le biogaz/la biomasse ou l'électricité.

Lors de la cuisson dans le four, on obtient une structure céramique irréversible pour le produit. Il faut donc un gradient de température extrêmement précis pendant la cuisson, pour garantir que les produits subissent le bon traitement. Il faut ensuite un refroidissement contrôlé, afin que les produits libèrent leur chaleur progressivement et conservent leur structure céramique. Les produits sont ensuite emballés et stockés pour livraison.

Les sections 2.2.1 à 2.2.13 ci-après décrivent les principales unités d'une usine de céramique ainsi que les étapes élémentaires et les variantes des procédés de fabrication [1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [5, InfoMil, 2003], [6, Timellini, 2004], [7, Dodd, 1994], [8, Ullmann's, 2001], [10, Navarro, 1998], [13, SYKE, 2004], [14, UBA, 2004], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [28, Schorcht, 2005], [29, IMA-Europe, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006].

En ce qui concerne les conditions standard des mesures de débits volumétriques et de concentrations, le lecteur pourra se reporter aux définitions suivantes, qui figurent également au glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, les débits volumétriques correspondent à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des effluents gazeux secs à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal et les concentrations en benzène correspondent à 15 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
état normal	désigne une température de 273 K et une pression de 1013 hPa.

2.2.1 Stockage et transport des matières premières

L'extraction de l'argile, du kaolin, des matières argileuses, du feldspath, du quartz et de la plupart des autres matières s'opère généralement dans des mines ou des carrières et, dans certains cas, l'argile peut provenir des berges d'un cours d'eau situé à proximité de l'usine de fabrication (c'est le cas notamment au Pays-Bas). L'acheminement jusqu'à l'usine de fabrication se fait principalement par camion, mais également par chemin de fer et, si la mine ou la carrière se trouve à proximité immédiate de l'usine de fabrication, il peut même se faire par convoyeur à bande.

En fonction de leurs caractéristiques et de l'étape de transformation, les matières premières sont stockées dans des cases de stockage à ciel ouvert, des entrepôts divisés en caissons, des alimentations en gros volume, des silos d'homogénéisation, des installations d'enfossage, des silos de maturation ou des silos secs. Ces silos sont équipés d'indicateurs de niveau, de soupapes de surcharge et de filtres ou d'unités de déplacement gazeux, en cas d'évacuation d'air poussiéreux par déplacement. Certaines matières sont également acheminées sous forme de liquide ou de suspensions aqueuses et sont donc stockées dans des cuves ou autres récipients.

Le matériel de transport au sein de l'usine est choisi selon les caractéristiques de la matière à acheminer, telles que sa granularité, sa résistance à l'attrition et son aptitude à l'écoulement, sa température, son débit et l'espace donné. Les matières sont transportées au moyen de machines d'extraction du type élévateur à godets, convoyeur à chaîne, convoyeur à vis, convoyeur pneumatique ou glissière. La barbotine de coulage est acheminée en partie par des canalisations.

2.2.2 Préparation des matières premières

On procède généralement à une première fragmentation et à une homogénéisation préliminaire lors de l'opération d'extraction, mais afin de satisfaire aux exigences techniques très strictes des produits céramiques actuels, il faut une préparation supplémentaire. On peut employer un ou plusieurs des procédés suivants, décrits aux sections 2.2.2.1 à 2.2.2.10, mais pas nécessairement dans cet ordre.

2.2.2.1 Préséchage

Il arrive que certaines matières premières aient besoin d'être préséchées, notamment le sable qui peut être préséché par la technique du lit fluidisé ou au moyen de séchoirs rotatifs. De nombreuses matières premières raffinées pour la céramique s'achètent auprès de fabricants spécialisés - généralement à l'état sec.

2.2.2.2 Pré-mélange

Le mélange des argiles peut commencer dès la carrière, notamment par creusement sélectif ou par empilement de la matière dans des couches horizontales superposées, puis en raclant verticalement cet empilement en vue d'alimenter l'usine.

2.2.2.3 Atmosphérisation/maturation

Dans des installations qui fabriquent des briques et des tuiles en argile, il faut stocker de grandes quantités de matières premières à base d'argile et de minéraux et le stockage initial se fait souvent en plein air. Dans certains cas - notamment dans les procédés de fabrication en pâte molle - un stockage de plusieurs mois permet d'améliorer la malléabilité de l'argile. Ce procédé porte le nom de « maturation », cette action d'atmosphérisation ayant le maximum d'efficacité pendant l'hiver.

2.2.2.4 Concassage primaire et secondaire, broyage et criblage

Un premier concassage grossier d'argiles relativement sèches ou friables peut être effectué par des rouleaux de concassage à grosses dents, généralement implantés dans la carrière, ou par des grands concasseurs à mâchoires. Les matières premières très dures (qui servent souvent à la fabrication des produits réfractaires) sont également fragmentées au moyen de concasseurs à mâchoires ou de concasseurs à cône, lesquels consistent tous deux à comprimer les blocs minéraux entre une surface dure fixe et une surface dure mobile.

Les broyeurs à marteaux permettent d'obtenir cette fragmentation grâce à des forces d'impact - les morceaux de matière première qui sont envoyés dans le broyeur éclatent lorsqu'ils sont frappés par les marteaux en rotation rapide.

Les broyeurs à meules verticales (p. ex. les broyeurs à meules par voie sèche ou humide) conviennent à la fragmentation des matières premières à plus forte plasticité. Les broyeurs à meules munis d'une base perforée permettent d'assurer une granulométrie maximale prédéfinie, et les broyeurs à meules par voie humide sont dotés d'une fonction supplémentaire qui permet le mélange des argiles sous apport d'eau.

Dans l'industrie de la terre cuite, les rouleaux de concassage s'emploient couramment pour désagréger, écraser et homogénéiser les particules d'argile. Des paires de rouleaux parallèles en acier dur et lisse sont entraînées dans des directions opposées de sorte que la matière première introduite entre ces rouleaux subit une action de pincement, de cisaillement et d'écrasement. On contrôle la granulométrie en réglant l'espacement entre les rouleaux.

Le déchiqueteur (ainsi que le broyeur à rouleaux), qui sert lorsqu'on a affaire à des matières premières plastiques, se compose d'un tambour rotatif fendu, équipé de lames coupantes. Les mottes d'argile sont poussées à travers les fentes sous forme de copeaux.

Le concasseur giratoire à percussion possède deux rotors équipés de percuteurs ou « patins » vissés. Ceux-ci sont en rotation l'un vers l'autre et ils tournent, malaxent et désagrègent en permanence la matière entrante.

2.2.2.5 Broyage par voie sèche ou par voie humide

Le procédé de fragmentation décrit ci-dessus permet généralement d'obtenir une granulométrie de 2 mm ou plus. De nombreuses applications céramiques nécessitent une comminution supplémentaire, notamment les carreaux pour sols et murs, les produits réfractaires et la vaisselle de table. Pour obtenir des particules d'environ 1 mm de diamètre, on emploie des broyeurs à rouleaux par voie sèche ou humide. Ils sont constitués de rouleaux verticaux qui fonctionnent à l'intérieur d'une bague extérieure, et une pression se crée entre le rouleau et la bague, par exemple grâce à la force centrifuge. La matière première issue de l'étape de concassage primaire est introduite dans le broyeur, avec ou sans eau, et elle est broyée jusqu'à obtention de la granulométrie souhaitée. Un broyage encore plus fin peut être obtenu avec des broyeurs à boulets continus ou discontinus (dans lesquels on fait tourner des boules de céramique dure dans des tambours montés à l'horizontale).

Les broyeurs à boulets constituent le choix normal pour l'industrie des carreaux pour sols et murs ; utilisés par voie humide, ils permettent de produire des poudres d'un grain inférieur à deux cents microns.

2.2.2.6 Criblage à sec/classification pneumatique

Afin d'optimiser certaines propriétés des céramiques (par ex. la densité), il est parfois nécessaire de mélanger certaines granulométries de matière. Le criblage à sec consiste généralement à utiliser des tamis vibrants, qu'on chauffe électriquement pour éviter les accumulations de matière et le colmatage.

Les classificateurs pneumatiques à base de cyclones de séparation peuvent également servir au dimensionnement granulométrique des poudres à sec. Dans chacun des cas, la matière présentant une granulométrie trop importante est généralement renvoyée dans le concasseur.

2.2.2.7 Séchage par atomisation

Ce procédé s'utilise couramment dans l'industrie du carrelage ainsi que dans la fabrication de vaisselle, de céramiques techniques et de produits réfractaires. La suspension aqueuse de matière première qui résulte du broyage humide par boulets (teneur en matière sèche ~ 60 à 70 %) est pulvérisée sous pression pour produire de fines gouttelettes qui entrent en contact avec un courant d'air chaud. Le séchage de ces gouttelettes produit des granulés creux, extrêmement uniformes et plus ou moins sphériques (d'une teneur en eau qui va généralement de 5,5 à 7 %). Cette forme poudreuse possède une forte aptitude à la coulée, ce qui permet de remplir avec précision les moules de pressage puis de presser des carreaux unitaires de grand format. Aujourd'hui, certaines sociétés sont spécialisées dans la préparation de poudre séchée par atomisation. Elles livrent la matière préfabriquée directement auprès des usines de l'industrie céramique dans laquelle s'opèrent les transformations ultérieures.

2.2.2.8 Calcination

Certaines matières premières céramiques sont précuites, généralement dans des fours rotatifs, des fours tunnels ou des fours droits, ce qui permet d'améliorer leurs propriétés. Par exemple, certains oxydes (comme la dolomite ou la magnésite) doivent être calcinés à mort, à des températures dépassant parfois 1800 °C, afin de pouvoir servir à la fabrication des réfractaires. La calcination des argiles (p. ex. du kaolin) réduit le retrait plastique des pâtes auxquelles elles sont ajoutées, ce qui permet de faciliter le contrôle de la granulométrie des produits et d'accélérer les cycles de cuisson. Aujourd'hui, certaines sociétés sont spécialisées dans la préparation de matières premières calcinées. Elles livrent la matière préfabriquée directement auprès des usines de l'industrie céramique dans laquelle s'opèrent les transformations ultérieures.

Le présent document ne traite pas de ces opérations de calcination en amont des matières premières, mais le lecteur trouvera des informations utiles à propos des « oxydes calcinés » et des « chamottes, pigments et charges calcinés » dans le BREF sur le ciment et la chaux, qui décrit la calcination de la dolomite ; dans le BREF sur la gestion des rejets et des débris de roche dans les activités d'exploitation minière, qui décrit le traitement du kaolin ; dans le projet de BREF sur la fabrication de produits chimiques inorganiques en grands volumes (solides et autres), qui décrit la fabrication de l'oxyde de magnésium et dans le projet de BREF sur la fabrication de produits chimiques inorganiques spécialisés, qui décrit la fabrication des pigments inorganiques spécialisés.

2.2.2.9 Matières synthétiques de base

On notera que certaines matières synthétiques comme le carbure de silicium peuvent être fabriquées par des fournisseurs spécialisés mais doivent néanmoins éventuellement subir un procédé de fragmentation.

2.2.2.10 Frittes et émaux, préparation de l'émail

Dans l'émaillage des carreaux céramiques pour sols et murs, on emploie des matières premières de nature vitreuse (frittes). Les frittes sont des composés vitreux, insolubles dans l'eau, qui sont préparés à partir de matières cristallines fabriquées par une fusion à haute température (1500 °C) suivie d'un refroidissement rapide. Les frittes sont fournies à l'industrie du carrelage par des fabricants de frittes (pour en savoir plus, voir le BREF sur la fabrication du verre).

A part les frittes, les principaux composants de l'émail sont la silice (vitrifiant) ainsi que les additifs qui servent de fondants et d'agents colorants (bases, terres alcalines, bore, plomb etc.), d'opacifiants (zirconium, titane etc.) et d'agents colorants (fer, chrome, cobalt, manganèse etc.).

Dans le procédé de préparation de l'émail, on broie généralement la fritte et les additifs dans un broyeur discontinu à boulets et à tambour jusqu'à obtention d'un rejet prédéfini. On fait passer cet émail à travers des tamis vibrants. On règle ensuite les conditions de la suspension aqueuse. Les caractéristiques de la suspension vont dépendre de la méthode d'application à utiliser.

On peut formuler toutes sortes d'émaux, en fonction du type de produit, de la température de cuisson, et des effets et propriétés souhaités pour le produit fini.

2.2.3 Mélange des composants

2.2.3.1 Généralités

La durée, l'intensité et l'ordre du mélange influent de façon importante sur les propriétés du mélange et donc sur le produit final. Les matières premières préparées, dans des proportions contrôlées, doivent être malaxées et homogénéisées pour obtenir l'uniformité physicochimique requise. En fonction du secteur céramique concerné, le mélange peut varier entre des opérations continues à grande échelle et un mélange discontinu et étroitement contrôlé à petite échelle. Le dosage peut se faire sur une base volumétrique (p. ex. via des alimentateurs linéaires placés sur des convoyeurs à bande) ou par poids (p. ex. via des alimentateurs à vis reliés à des doseurs à bande).

La plupart des opérations de façonnage céramique nécessitent des matières premières ayant une teneur donnée en eau ou en liant, et les additifs mineurs tels que les pigments, les agents antimousse et les liants doivent être dosés précisément puis répartis uniformément dans le mélange. Dans la fabrication des réfractaires, on optimise les propriétés de certains produits en malaxant avec précaution plusieurs fractions granulométriques de matière première. A l'heure actuelle, le dosage des composants du mélange est souvent automatisé, la commande par ordinateur des mécanismes d'alimentation permettant de modifier rapidement la « composition » du mélange. Dans certains cas, principalement en briqueterie, on mélange également l'argile à des additifs de type combustible solide (par exemple du coke fin) afin de réduire les temps de cuisson.

2.2.3.2 Mélangeurs en continu

Le mélangeur à deux hélices : couramment utilisé dans l'industrie de la terre cuite, il se compose d'une cuve comportant deux hélices parallèles qui tournent l'une vers l'autre. Ces hélices sont équipées de pales et de lames qui assurent un mélange énergétique. Le pas des pales fait avancer la masse vers l'extrémité de déversement.

Le mélangeur à une hélice : il procure un mélange plus doux que la version à deux hélices, mais il permet de malaxer des mélanges argileux avec de l'eau avant l'extrusion. Ce mélangeur se termine généralement par une vis sans fin (hélice de scellement) qui comprime le mélange argileux préparé.

Le broyeur à meules (mélangeur à meules) : la fonction de broyage de ces meules a été décrite à la section 2.2.2.4. Dans la version broyeur à meules par voie sèche, la sole tourne et les meules (molettes folles en acier dur) ont un axe fixe, tandis que pour le broyeur à meules par voie humide, la sole est fixe et les meules sont entraînées en rotation autour de l'axe vertical. Ce dispositif permet un brassage en profondeur du mélange argileux, de l'eau et de quelques additifs.

Le déchiqueteur et le concasseur giratoire à percussion : ces modèles ont également été cités à la section 2.2.2.4 et là encore, ils remplissent une double fonction, à la fois un très bon mélange et une très bonne fragmentation.

2.2.3.3 Mélangeurs discontinus

Le mélangeur à lame en Z (pétrin) : il existe plusieurs modèles, mais tous fonctionnent selon le même principe de découpe et de pétrissage. Ils s'utilisent généralement pour des matières premières plastiques, mais peuvent aussi prendre en charge des poudres plus sèches.

Le mélangeur à tambour : il convient au mélange de matières relativement sèches et d'un grain uniforme. Le tambour chargé tourne pendant le temps nécessaire.

Le mélangeur à cuve tournante : il fonctionne selon le même principe que la grosse bétonnière et pour obtenir le meilleur résultat, on le charge avec des quantités mesurées de chaque composant pendant que la cuve tourne. Pour obtenir un mélange en profondeur, on utilise des racleurs, des rabots et des déflecteurs ; un mélangeur de ce type est capable de mélanger de l'argile en granulés avec de fines poudres.

Le mélangeur à arbre tournant (délayeur) : dans cette version, la cuve est fixe et un arbre central tourne, comportant généralement des bras qui sont eux-mêmes équipés de pales ou de lames tournantes. Ces dernières balayent le fond de la cuve selon un mouvement planétaire et permettent d'obtenir une efficacité de malaxage du mélange similaire à celle du type à cuve tournante.

La cuve à agitation : elle s'utilise pour le mélange de barbotines et suspensions aqueuses diverses utilisées dans l'industrie céramique. Bien que des agents de suspension soient généralement inclus, il faut souvent maintenir l'action d'agitation jusqu'à l'utilisation des barbotines et autres, soit dans la cuve à agitation soit dans un bac de stockage séparé.

2.2.4 Façonnage/formage des produits

2.2.4.1 Généralités

Les produits céramiques traditionnels ont toujours été façonnés à partir de matières premières à l'état plastique et cette opération, pendant des millénaires, a été manuelle. A l'heure actuelle, il existe une demande pour des spécifications techniques de plus en plus strictes englobant des propriétés telles que la tolérance dimensionnelle, la densité, la résistance, la durabilité et la réfractarité. Par ailleurs et dans de nombreux cas, les qualités esthétiques sont de première importance. La méthode utilisée pour façonner les produits peut influencer de manière considérable sur les propriétés définitives de ceux-ci, et la gamme des techniques de façonnage s'est considérablement développée entre les différents secteurs de l'industrie céramique.

2.2.4.2 Pressage

2.2.4.2.1 Pressage mécanique

Cette méthode s'emploie encore dans la briqueterie (par ex. pressage par voie semi-sèche) et la fabrication des produits réfractaires. On charge les moules avec un volume prédéfini de granulés d'argile et l'on applique une pression généralement par le haut et par le bas, les pistons étant entraînés par l'action des cames et aidés par de lourds volants.

2.2.4.2.2 Pressage hydraulique

Les presses hydrauliques actuelles disposent d'une force de compactage élevée, d'une forte productivité, de cohérence et sont faciles à régler. Aujourd'hui, de nombreuses presses sont équipées de systèmes de commande électroniques qui sont capables de vérifier la hauteur des produits et de régler automatiquement le cycle pour assurer l'uniformité des dimensions. Ces presses sont facilement réglables pour satisfaire à différents critères, notamment aux programmes de pressage complexes tels que ceux qui sont utilisés dans le façonnage de formes réfractaires complexes. Le pressage hydraulique a été largement adopté pour le façonnage des carreaux. Dans le cas des carreaux céramiques, la poudre humide (d'une teneur en eau de 5,5 à 7 %) est pressée dans des moules peu profonds, alors que les tuiles en argile sont généralement formées par pressage de « galettes » d'argile plastique découpées dans un boudin extrudé.

2.2.4.2.3 Pressage par impact

Cette méthode est un façonnage à haut niveau d'énergie par impact pneumatique et mécanique qui consiste en un vérin à haute vitesse venant frapper une poudre contenue dans un moule. Cette technique s'emploie dans la fabrication des produits réfractaires spéciaux.

2.2.4.2.4 Pressage par friction

Les presses (à vis) à friction à entraînement mécanique sont généralement utilisées pour la fabrication de formes réfractaires, bien qu'elles soient progressivement remplacées par des presses hydrauliques.

2.2.4.2.5 Pressage isostatique

Certains produits haut de gamme nécessitent une densification uniforme qui peut s'obtenir en appliquant la même pression sur toutes les surfaces. Dans une presse isostatique, on remplit des moules en caoutchouc ou en polyuréthane de poudre céramique et on les place dans une cuve remplie de liquide. On applique ensuite une pression hydrostatique élevée, puis on démoule les produits. Cette méthode est employée dans les secteurs des réfractaires et des céramiques techniques ainsi que dans la fabrication des carreaux et de la vaisselle de table.

2.2.4.3 Extrusion

L'extrusion s'utilise couramment pour la fabrication des briques et blocs d'argile, des tuyaux en grès et des carreaux céramiques pour sols et murs. Ce procédé sert également à fabriquer des « dalles » semi-finies qui seront ensuite pressées pour former des tuiles, des réfractaires etc. L'extrusion exige une matière première plastique, donc une teneur en argile généralement importante. On malaxe la pâte plastique avec de l'eau jusqu'à obtenir la consistance souhaitée, puis on la force à travers la filière de l'extrudeuse - généralement au moyen d'une puissante étireuse. Une phase de désaérage sous vide est généralement prévue avant l'étireuse, pour améliorer la consolidation du boudin d'argile. On découpe enfin ce dernier en unités d'une longueur requise, en poussant des sections du boudin à travers plusieurs fils verticaux fortement tendus.

L'extrusion convient parfaitement à la fabrication continue et à grande échelle de briques, tuyaux etc., et elle est idéalement adaptée à la fabrication de produits perforés, notamment des blocs de maçonnerie légers.

2.2.4.4 Moulage

Il s'agit d'une méthode extrêmement ancienne de façonnage de produits en argile - la brique la plus ancienne connue (non cuite) remonte à plus de 10000 ans. Dans de nombreuses régions du monde, les systèmes en adobe sont encore couramment utilisés. Le moulage était manuel et l'on a créé de simples moules en bois afin d'assurer des formes et dimensions plus uniformes. Le moulage des produits en argile nécessite beaucoup moins de puissance et d'énergie que le pressage ou l'extrusion, mais il lui faut un mélange beaucoup plus tendre (humide), ce qui entraîne davantage de retrait au séchage et un apport d'énergie calorifique plus important pour le séchage.

Les briques moulées qui ont été fabriquées selon le procédé dit à « pâte molle » possèdent des propriétés texturales et esthétiques spéciales qui sont très prisées - notamment pour préserver la richesse du patrimoine architectural de nombreuses villes et régions d'Europe. On fabrique encore des briques moulées main, qui affichent des prix élevés, mais aujourd'hui, en Europe occidentale, la plupart des briques moulées sont fabriquées mécaniquement sur des machines perfectionnées. Ces machines « jettent » toujours des mottes d'argile individuelles dans des moules préalablement sablés. Le moulage des produits se pratique également dans le secteur des réfractaires, afin de former des produits grand format (pesant parfois plus d'une tonne). Le mélange, qui doit avoir une viscosité précise, est coulé dans le moule. Dans ce cas, des vibrations (appliquées au moule ou directement au mélange à l'aide d'aiguilles vibrantes) servent à consolider le mélange et à assurer un remplissage complet du moule. Ce procédé porte le nom de « formage par vibromoulage ».

2.2.4.5 Coulage en barbotine

Ce procédé est très largement utilisé dans la fabrication des appareils sanitaires, de la vaisselle et des objets décoratifs ainsi que pour la fabrication des céramiques techniques et des produits réfractaires spéciaux et complexes. On mélange la matière minérale finement broyée avec de l'eau pour produire une barbotine d'argile (suspension aqueuse stable) que l'on verse dans un moule poreux traditionnellement en plâtre à gypse durci. La capillarité du moule extrait le liquide de la suspension pour former une coulée extrêmement solide sur la surface interne du moule. L'épaisseur de la paroi augmente progressivement et, au fil du temps, on obtient (le cas échéant) un corps complètement solide avant démoulage.

Les appareils sanitaires sont de relativement grande taille et sont formés par un coulage classique en barbotine ou (plus directement) dans des machines de coulage sous pression.

2.2.4.6 Coulage par fusion

Cette technique étant onéreuse aussi bien en termes de coût que d'énergie, son utilisation est réservée aux applications céramiques spécialisées. Les briques réfractaires subissent des attaques chimiques et physiques sévères par les laitiers, le clinker etc. Le coulage par fusion consiste à préfondre les matières premières sélectionnées et à les verser dans des moules. On obtient alors des produits à forte densité, à faible porosité et dotées d'une cohérence intercristalline extrêmement forte avec une microstructure régulière. Ces propriétés leur confèrent une résistance améliorée à la corrosion et à l'érosion ainsi qu'une excellente résistance mécanique à haute température. Une des caractéristiques de ce procédé est le fort retrait de la fonte d'oxydes lors de la solidification (de l'ordre de 15 % par volume). Il faut un refroidissement lent et contrôlé pour éviter que les pièces coulées ne se cassent et pour contrôler le processus de cristallisation.

2.2.5 Séchage des produits céramiques

2.2.5.1 Généralités

Traditionnellement, la plupart des articles en argile séchaient de façon « naturelle », à l'air libre et à température ambiante. Dans de nombreuses régions d'Europe, cette opération n'était efficace qu'en été. Dans l'industrie de la brique et de la tuile, on employait de simples claies de séchage qui permettaient de faire durcir des rangées superposées d'articles sous une simple couverture de bois léger qui les protégeait contre la pluie.

Dans l'industrie céramique moderne, il est nécessaire d'optimiser le séchage en termes de vitesse, de rendement thermique et de réduction des déchets. A l'exception des procédés de séchage lents et contrôlés, il faut maintenir un contrôle strict des vitesses de chauffage, de la circulation de l'air, de la température et de l'humidité. Aujourd'hui, la chaleur de l'air de séchage est principalement fournie par des brûleurs à gaz et par l'air chaud récupéré de la zone de refroidissement des fours. La chaleur pour l'air de séchage peut également être fournie par cogénération ou par un autre combustible tel que le charbon, le biogaz ou le coke de pétrole.

Les matières premières céramiques ont des sensibilités diverses au séchage, mais la plupart bénéficient d'une période d'échauffement initial dans des conditions de forte humidité (et peu ou pas d'évacuation de l'humidité), suivie de l'étape principale de séchage où les produits rencontrent un air plus chaud et plus sec. Ce sont les toutes dernières fractions d'eau qui sont les plus difficiles à évacuer, et il leur faut l'air le plus chaud et le plus sec possible. Les différentes formes de séchoirs ont évolué pour satisfaire aux besoins des différents secteurs de l'industrie, dans lesquels la nature et les dimensions des composants céramiques sont immensément variées.

2.2.5.2 Séchoirs à plancher chauffant

Cette méthode de séchage très simple n'est plus très souvent utilisée et n'est adaptée ni à la mécanisation, ni à l'automatisation. En revanche, elle peut toujours servir pour un séchage lent et doux d'articles céramiques complexes grand format comme les appareils sanitaires ou certains produits réfractaires. Certaines briques de forme spéciale peuvent également être séchées de cette manière. Comme son nom l'indique, l'action de séchage résulte de la chaleur qui est transmise directement à la base des produits en contact avec un plancher chauffé, et des courants de convection de l'air au-dessus de ce plancher. Les flux d'air latéraux sont minimes, et toutes les surfaces des produits sèchent à basse vitesse, ce qui évite de soumettre inutilement la pâte à des contraintes au cours du séchage.

2.2.5.3 Séchoirs à chambres (intermittents)

Ces séchoirs comportent une batterie de chambres dotées de trappes d'entrée à ajustement serré, généralement desservies par des rails véhiculant des wagonnets de séchage. Ces derniers sont chargés de palettes ou d'étagères de séchage, empilées verticalement selon un espacement uniforme. Des systèmes de convoyage entièrement automatiques ont maintenant été mis au point, avec une alimentation par wagonnet de transport des étagères permanentes du séchoir.

Les produits céramiques tels que briques, blocs, tuyaux et formes réfractaires sont posés sur les étagères, et les wagonnets de séchage chargés sont transportés jusqu'à l'intérieur des chambres qui sont hermétiquement fermées une fois pleines. Dans les installations actuelles, toute cette opération est automatisée au plus haut degré. On élève la température de la chambre à une vitesse contrôlée, soit directement - par l'injection d'air chaud - soit indirectement, via des surfaces de transfert de chaleur. La recirculation de l'air permet d'améliorer l'efficacité du séchage. Le transfert de chaleur se fait principalement par convection, et un peu par rayonnement grâce à l'air chaud et aux surfaces chauffées. On utilise des profils spécifiques de température et d'humidité qui correspondent à tel ou tel produit céramique.

Les séchoirs à chambres présentent un intérêt particulier lorsqu'il s'agit de fabriquer diverses pâtes céramiques ; lorsque les pâtes ont une teneur élevée en eau, ou lorsque la fabrication se fait par intermittence. Par ailleurs, il est facile de construire d'autres chambres, si nécessaire.

2.2.5.4 Séchoirs tunnel (continus)

Il s'agit essentiellement d'une longue structure en tunnel, le long de laquelle on pousse une file de wagonnets de séchage chargés de produits en céramique crue. On introduit de l'air à haute température dans le tunnel par l'extrémité de sortie, cet air étant amené à s'écouler vers l'extrémité d'entrée grâce à un ou plusieurs ventilateurs. Au fur et à mesure que l'air descend dans le séchoir, il transfère de la chaleur au produit et sa teneur en humidité augmente. On installe normalement des ventilateurs de recirculation, afin d'augmenter la turbulence et d'améliorer l'efficacité de séchage. La longueur du séchoir tunnel dépend de la cadence de fabrication requise pour le produit et de la teneur en eau de la céramique.

2.2.5.5 Séchoirs verticaux

Le séchoir vertical sert principalement dans le secteur du carrelage céramique, les carreaux étant introduits dans des paniers constitués de plusieurs étages de rouleaux. Ces groupes de paniers montent à travers les séchoirs, où ils rencontrent des gaz de séchage chauds. La température régnant dans un séchoir de ce type est généralement inférieure à 200 °C et les cycles de séchage varient entre 35 et 50 minutes.

2.2.5.6 Séchoirs à rouleaux à plusieurs étages horizontaux

Ce type de séchoir s'utilise également de façon courante chez les fabricants de carrelage céramique. Le séchoir horizontal est conçu selon le principe du four à rouleaux. Les carreaux individuels sont introduits sur les différents étages situés à l'intérieur du séchoir et sont acheminés horizontalement par des rouleaux d'entraînement. Des brûleurs situés sur les côtés du séchoir produisent l'air chaud de séchage, lequel circule à contre-courant des produits.

La température maximale de ces séchoirs est généralement supérieure à celle de leurs homologues verticaux (environ 350 °C) et leurs cycles de séchage sont plus courts, entre 15 et 25 minutes.

2.2.5.7 Séchoirs déshumidificateurs

Ces séchoirs sont en principe des systèmes intermittents (à chambres). La technique consiste à maintenir le niveau d'humidité de l'air dans la chambre de séchage bien en dessous du niveau de saturation, afin que l'eau continue de s'évaporer des produits sans qu'il soit nécessaire d'augmenter la température. Pour maintenir cet effet, il faut évacuer la vapeur d'eau en permanence de la chambre, cette opération consistant généralement à faire circuler l'air à travers un condensateur réfrigéré.

Ces séchoirs doivent être absolument étanches afin d'empêcher la pénétration d'un air ambiant potentiellement humide et ils sont normalement équipés de commandes d'humidité programmables, permettant d'optimiser le séchage. L'échelle d'utilisation de ces séchoirs est limitée, mais ils conviennent parfaitement au séchage des produits céramiques sensibles, des formes spéciales etc. Cette technique de séchage ne produit que de l'eau liquide comme flux de déchet.

Une autre possibilité consiste à introduire de la vapeur saturée dans un séchoir tunnel. Dans ce séchoir tunnel à vapeur, on diminue l'humidité de l'air de séchage dans les différents secteurs du séchoir pour garantir un séchage contrôlé.

2.2.5.8 Séchoirs par infrarouge et à micro-ondes

En principe, les séchoirs par infrarouge et à micro-ondes peuvent éventuellement servir d'alternative aux séchoirs conventionnels. A ce sujet et notamment à propos des micro-ondes, voir le chapitre 6 intitulé « Techniques émergentes pour la fabrication des céramiques ».

2.2.6 Traitement de surface et décoration des produits céramiques

2.2.6.1 Texturation des produits argileux

On peut texturer la surface d'un produit en argile pour des raisons fonctionnelles, par exemple pour obtenir une finition antidérapante sur les carreaux de sol.

Un grand nombre de textures sont également appliquées aux produits en argile pour des raisons esthétiques. Les briques à pâte molle acquièrent une agréable forme aléatoire « à plis » au fur et à mesure que la motte d'argile est jetée dans le moule, et le moulage manuel produit des finitions particulièrement appréciées. Les produits extrudés peuvent être texturés par raclage, en raclant la surface du boudin d'argile. Une autre technique consiste à extruder un boudin un peu trop gros, puis à le rogner au moyen de fils coupants pour obtenir la bonne hauteur et la bonne largeur.

La suppression de la phase de désaéragage du boudin d'argile permet parfois d'obtenir une meilleure texture de raclage. Des rouleaux texturés peuvent donner diverses textures aux produits extrudés.

Les briques pressées sont souvent assez dures à l'état cru et, une fois qu'elles sont assemblées sous forme de boudin continu sur un convoyeur à bande, on utilise des lames tournantes pour leur donner un aspect « rustique » ou pour texturer ces briques. On peut également les texturer au rouleau, souvent après les avoir préalablement vaporisées avec de l'eau pour en adoucir les surfaces.

2.2.6.2 Revêtements appliqués

Les briques à pâte molle reçoivent un revêtement de surface en sable provenant de l'intérieur des moules, lesquels ont été préalablement enduits d'un sable servant d'agent de démoulage. On peut obtenir toutes sortes de textures et de couleurs de cuisson en choisissant le sable selon des critères d'esthétique.

Dans le cas des briques, des blocs ou des tuiles pressés ou extrudés, on peut appliquer du sable ou d'autres minéraux en granulats sur les surfaces de boutisses ou paneresses au moyen de pistolets à air comprimé. On ajoute souvent des pigments au sable pour faire varier l'aspect esthétique de la finition.

2.2.6.3 Emailage, engobage et autres techniques décoratives

Il existe un petit marché spécialisé pour la brique émaillée. L'émaillage est la technique la plus répandue dans la fabrication des carreaux pour sols et murs, des appareils sanitaires et de la vaisselle de table et, à l'heure actuelle, la part du marché évolue également vers les tuiles. L'engobage est employé principalement dans la fabrication des tuiles en argile et des carreaux céramiques pour sols et murs.

Les composants de l'émail finement broyés - essentiellement des frites dans le cas des carreaux céramiques - sont préparés sous forme de suspension aqueuse. La viscosité et les caractéristiques de suspension sont réglées en fonction de la méthode d'application, qui peut être la pulvérisation, l'émaillage par écoulement d'eau, l'émaillage à sec ou la décoration. Lors de l'émaillage, dans la plupart des secteurs susmentionnés - à l'exception des appareils sanitaires - on fait durcir le produit en céramique crue séché par une cuisson de biscuit puis, selon les composants d'émail appliqués, on le recouvre d'une couche vitreuse, lisse, transparente ou sombre.

L'engobe s'applique généralement à l'issue du séchage et, dans certains cas, les produits sont engobés même à l'état cru ou cuit. Lors de l'engobage, on applique une couche de masse céramique à grain fin, non transparente, claire ou colorée sur la partie visible ou sur la totalité de la surface, par trempage ou par coulage.

La sérigraphie est l'une des techniques décoratives qu'on emploie pour les carreaux, en raison de la facilité de l'appliquer dans les lignes d'émaillage. Cette technique consiste à imprimer un motif donné au moyen d'un ou plusieurs écrans d'impression (tissu tendu avec une ouverture de maille prédéfinie). La surface de l'écran est masquée et l'encre d'impression ne pénètre que par les ouvertures des motifs à reproduire. Une raclette force l'encre à travers des ouvertures, imprimant ainsi le motif sur le carreau.

D'autres techniques de décoration sont la technique de gravure et l'impression flexographique. Dans ces techniques, le motif est transféré directement sur un ou plusieurs rouleaux. L'encre est appliquée sur le carreau à partir de ces rouleaux et cette technique permet d'imprimer sur les bords des carreaux ou sur des carreaux en relief. Une autre technique a récemment fait son apparition, celle de l'impression par jet d'encre. Pour la vaisselle de table, on utilise également la peinture à la main ou les décors par transfert.

2.2.7 Cuisson

2.2.7.1 Objectifs de la cuisson

La cuisson est un processus clé de la fabrication des produits céramiques, car c'est d'elle que vont dépendre un certain nombre de propriétés importantes du produit fini, entre autres la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, et la tenue au feu.

2.2.7.2 Modifications physico-chimiques lors de la cuisson

Les matières premières utilisées dans les pâtes céramiques sont généralement des mélanges complexes de minéraux argileux avec d'autres matières minérales comme le quartz, les feldspaths, les carbonates, le gypse, les oxydes de fer et parfois des matières organiques. Les produits réfractaires sont également fabriqués à partir de minéraux non argileux extrêmement variés, conjugués avec des additifs et liants spécialisés (qui peuvent inclure certaines argiles). Lorsque des produits céramiques à base d'argile cuisent dans un four, l'humidité résiduelle éventuelle est évacuée à des températures comprises entre 100 et 200 °C. Si des matières organiques et des pyrites de fer sont présentes, une oxydation se produit à des températures comprises entre environ 300 et 500 °C. L'eau enfermée à l'intérieur de la structure d'un minéral argileux (« eau cristalline ») se libère généralement à des températures comprises entre 500 et 650 °C, tandis que les carbonates comme la calcite et la dolomite se dissocient lors de la libération du dioxyde de carbone dans une plage de températures de 750 à 950 °C.

En ce qui concerne le développement des propriétés céramiques, les principales modifications sont la décomposition de la structure réticulée des minéraux argileux d'origine, suivie de la formation de nouveaux composés cristallins et de phases vitreuses. La température à laquelle se produit la vitrification (formation de verre) varie selon la structure minéralogique de l'argile. Cette vitrification commence généralement à environ 900 °C et se termine à environ 1050 °C (pour de nombreuses argiles de briqueterie) ou à environ 1100 °C dans le cas des argiles plus réfractaires.

Lors de la phase de vitrification de la cuisson des céramiques, de nombreux minéraux non argileux tels que le quartz, les oxydes de fer, les composés à base de chaux et les bases (oxydes de sodium et de potassium) sont enfermés dans la pâte cuite. On assiste à un certain degré de frittage et de solution solide, ainsi qu'à des réactions eutectiques au niveau de la jonction entre les grains minéraux et les phases de fusion.

Les produits non argileux tels que certains produits réfractaires dépendent également des phases de frittage, de vitrification ou de recristallisation, mais dans la plupart des cas il faut des températures beaucoup plus élevées pour obtenir les propriétés souhaitées. Sur la figure ci-après sont présentées les plages de températures de maturation des différents groupes de produits [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Technical ceramics, 450 - 2500 °C	Céramiques techniques, de 450 à 2500 °C
Earthenware	Faïence
Vitreous china	Porcelaine vitrifiée
High alumina bricks	Briques à haute teneur en alumine
Inorganic bonded abrasives	Abrasifs inorganiques
Pottery ware	Poterie
Stoneware	Grès
Porcelain	Porcelaine
Clay blocks	Blocs d'argile
Wall and floor tiles	Carreaux pour sols et murs
Basic bricks	Briques basiques
Facing bricks and clinkers	Briques de parement et clinkers
Silica bricks	Briques de silice
Roof tiles	Tuiles
Fireclay bricks	Briques d'argile réfractaire
Expanded clay aggregates	Granulats d'argile expansée

Figure 2.1 : Plages de températures industrielles de maturation de différents groupes de produits

Les températures nécessaires à la cuisson sont atteintes principalement par combustion de gaz naturel et de fioul. Dans certains cas, on emploie également des combustibles solides, du biogaz/de la biomasse et de l'énergie électrique pour produire de la chaleur.

2.2.7.3 Fours intermittents (périodiques)

Ils comprennent les fours intermittents et les fours à cloche, qui reposent sur une chambre unique et qui sont chargés avec les produits céramiques préséchés (dans un four à cloche, la cloche équipée de l'élément chauffant est placée sur le fond par un système de levage ; dans les fours intermittents, les produits à cuire sont amenés sur la sole à l'aide d'une navette), fermés hermétiquement puis soumis à un cycle de cuisson prédéfini. On emploie généralement des brûleurs à gaz, ce qui permet de commander correctement la température et l'atmosphère du four (oxydation ou réduction).

On utilise également l'électricité pour chauffer les fours intermittents, notamment dans la fabrication des céramiques techniques. Les fours spéciaux destinés aux céramiques techniques sont, par exemple, les fours de type HIP (pression isostatique à chaud), les fours à haute température et les fours à atmosphère protectrice.

Les fours intermittents servent principalement à la fabrication à petite échelle de produits spécialisés tels que les briques spéciales et les raccords de canalisation, les raccords pour tuiles, les produits réfractaires etc. Ils procurent une certaine flexibilité en cas de modification fréquente de la composition de la pâte céramique, et tous ces avantages compensent d'une certaine manière leur efficacité énergétique légèrement inférieure. Les figures ci-après montrent la coupe transversale d'un four intermittent [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

<u>Cross-section of a shuttle kiln</u>	<u>Coupe transversale d'un four intermittent</u>
Flue-gas	Effluents gazeux
Ware to be fired	Produits à cuire
Fired volume	Volume de cuisson
Possible fuel feed	Arrivée possible du combustible
Shuttle car	Navette

Figure 2.2 : Coupe transversale d'un four intermittent

2.2.7.4 Fours continus

2.2.7.4.1 Fours à chambre (Hoffmann)

Ces fours sont constitués d'une série de chambres reliées, qui sont successivement remplies de produits secs (par exemple des briques), fermées hermétiquement, mises en cuisson quasi continue et où les gaz chauds sont attirés d'une chambre dans la suivante. Ce système de liaison, avec des conduits de fumée et des orifices entre les chambres, permet également de préchauffer les produits et de refroidir les effluents gazeux, ce qui améliore le rendement thermique et permet de réduire les coûts par rapport à un four intermittent. Aujourd'hui, ces fours fonctionnent principalement au gaz, mais une alimentation par le dessus, au fioul ou au charbon, se pratique occasionnellement. Ils servent principalement à la fabrication de produits spécialisés, par exemple des briques spéciales de couleur.

2.2.7.4.2 Fours tunnels

Ce sont essentiellement des tunnels réfractaires desservis par des rails transportant des wagonnets de four. Ces derniers comportent des supports réfractaires sur lesquels on dépose les produits séchés selon des motifs stables prédéfinis. Les wagonnets sont poussés à travers les fours à intervalles prédéfinis, à contre-courant d'un flux d'air aspiré par un ou plusieurs ventilateurs vers un conduit d'évacuation situé à proximité de la zone d'entrée des wagonnets. La plupart des fours tunnels fonctionnent aujourd'hui au gaz, la température étant maximale dans la zone de cuisson située vers le centre du four. Les produits entrants sont préchauffés par les gaz chauds en provenance de la zone de cuisson, tandis que l'air entrant refroidit les produits cuits et est lui-même préchauffé pour assurer sa fonction de combustion. Une fraction de cet air en provenance de la zone de refroidissement s'évacue généralement vers les séchoirs adjacents, ce qui permet des économies significatives en combustible.

Les chambres de cuisson et les wagonnets de four sont généralement rendus étanches à l'air secondaire grâce à un joint de sable. Les fours de construction récente sont rendus étanches avec de l'eau ou d'autres solutions mécaniques améliorées. L'objectif de ces opérations est de réduire les temps de cuisson et la consommation énergétique en ayant une chambre de cuisson étanche au gaz.

La figure 2.3 et la figure 2.4 montrent une vue schématique de la structure et de la coupe transversale d'un four tunnel [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Preheating zone	Zone de préchauffage
Firing zone	Zone de cuisson
Cooling zone	Zone de refroidissement
Stack	Cheminée
Flue	Conduit de fumée
Flue-gaz	Effluents gazeux
Ware to be fired	Produits à cuire
Air	Air
Transfer tube	Tube de transfert
Air inlet	Admission d'air
Transverse track	Voie transversale
Preheater	Préchauffeur
Charging and discharging track	Voie de chargement et de déchargement

Figure 2.3 : Vue schématique d'un four tunnel

Possible fuel feed	Arrivée possible du combustible
Top of kiln car	Sole du wagonnet de four
Ware to be fired	Produits à cuire
Tunnel kiln car	Wagonnet de four tunnel
Sand sealing	Joint de sable
Inspection channel	Canal de contrôle

Figure 2.4 : Coupe transversale d'un four tunnel avec wagonnet

2.2.7.4.3 Fours à rouleaux

Aujourd'hui, les fours à rouleaux à un étage s'utilisent de façon quasi universelle pour la fabrication des carreaux pour sols et murs, et les programmes de cuisson ont été réduits à moins de 40 minutes. Les carreaux sont transportés par des rouleaux d'entraînement, et la chaleur de cuisson est fournie par des brûleurs à gaz naturel et air qui sont situés sur les côtés du four. Les principaux mécanismes de transmission de la chaleur sont la convection et le rayonnement, et comme les fours ne sont pas pourvus d'une moufle, les coefficients de transmission de la chaleur sont plus élevés, ce qui permet de réduire le cycle de cuisson et la consommation d'énergie. Les fours à rouleaux s'utilisent parfois également pour la fabrication de tuiles en argile, de tuyaux en grès, d'appareils sanitaires et de vaisselle de table. La figure suivante montre la coupe transversale d'un four à rouleaux [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

<u>Cross-section of a roller hearth kiln</u>	<u>Coupe transversale d'un four à rouleaux</u>
Fired volume	Volume de cuisson
Ware to be fired	Produits à cuire
Drive	Entraînement
Flue-gas	Effluents gazeux
Possible fuel feed	Arrivée possible du combustible
Kiln rollers	Rouleaux de four

Figure 2.5 : Coupe transversale d'un four à rouleaux

2.2.7.4.4 Fours à dalles glissantes

Ce sont également des fours à cuisson rapide et ils fonctionnent sur un principe similaire à celui du four à rouleaux. Toutefois, ici, les produits sont placés sur des « wagons » réfractaires qui se déplacent sur des roues montées sur des rails extérieurs au four proprement dit. Le four à dalles glissantes peut accepter des produits de taille et de forme plus ou moins irrégulière, alors qu'un four à rouleaux ne peut traiter que des produits de forme régulière.

2.2.7.5 Cuisson en meule

Un nombre limité de briques traditionnelles sont encore fabriquées par cuisson en meule. On assemble des briques séchées, contenant un additif combustible solide (par exemple des fines de coke) en gros blocs denses et rectangulaires - appelés meules - sur un socle de briques cuites. On ménage des conduits de fumée dans les couches de base, avec des couches de coke pour lancer la cuisson. On habille enfin la meule de briques cuites, en inclinant les parois externes vers l'intérieur pour améliorer la stabilité.

Une fois l'ensemble allumé, le feu progresse lentement en brûlant le combustible contenu à l'intérieur des briques. La cuisson de la meule dure plusieurs semaines, temps de refroidissement compris, après quoi la meule est démontée manuellement et les briques sont triées selon des qualités prédéfinies.

2.2.7.6 Fours rotatifs

Un four rotatif se présente sous forme d'un long cylindre, généralement incliné et tournant lentement autour de son axe. Ce four fonctionne avec un brûleur qui est fixé axialement par rapport à son extrémité inférieure. Les fours rotatifs sont utilisés pour la fabrication des granulats d'argile expansée.

Les fours rotatifs peuvent également servir à la calcination de l'argile réfractaire et à celle de la dolomite ou de la magnésite. Le présent document ne traite pas de ces opérations de calcination en amont des matières premières, mais le lecteur trouvera des informations utiles à propos des « oxydes calcinés » et des « chamottes, pigments et charges calcinés » dans le BREF sur le ciment et la chaux, qui décrit la calcination de la dolomite ; dans le BREF sur la gestion des rejets et des débris de roche dans les activités d'exploitation minière, qui décrit le traitement du kaolin ; dans le projet de BREF sur la fabrication de produits chimiques inorganiques en grands volumes (solides et autres), qui décrit la fabrication de l'oxyde de magnésium et dans le projet de BREF sur la fabrication de produits chimiques inorganiques spécialisés, qui décrit la fabrication de pigments inorganiques spécialisés.

2.2.7.7 Lits fluidisés

Un lit fluidisé est un lit de particules solides qui sont maintenues en suspension dans un gaz et qui se comportent donc de façon relativement similaire à un fluide. La poudre destinée à être fluidisée repose sur un socle poreux, p. ex. une goulotte en céramique spéciale à travers laquelle le gaz (généralement de l'air) s'introduit par dessous et sous pression. Ce principe sert de méthode pour acheminer des poudres le long d'une goulotte en céramique poreuse légèrement inclinée. La poudre peut être simultanément séchée et/ou calcinée.

2.2.7.8 Récupération de la chaleur lors du refroidissement

Lorsque cela est possible, on accélère le refroidissement des produits céramiques cuits en forçant l'air à circuler à travers ces produits dès après la zone de cuisson. Cette opération produit d'importants volumes d'un air propre et chaud, dont une majeure partie provient du four grâce à l'action d'un ventilateur et est utilisée pour le séchage. Cette méthode de récupération de la chaleur est particulièrement efficace lorsqu'on l'applique à un four tunnel.

2.2.8 Traitements ultérieurs (finition des produits)

2.2.8.1 Usinage (meulage, perçage, sciage)

Des opérations d'usinage peuvent être nécessaires pour produire des produits céramiques dont la forme définitive ou la tolérance dimensionnelle ne peuvent s'obtenir techniquement ou de façon suffisamment précise lors des traitements primaires (notamment pour les formes ou blocs grand format).

2.2.8.1.1 Meulage humide

Le meulage humide s'utilise pour la finition de produits qui exigent la tolérance dimensionnelle la plus stricte. Le meulage est un procédé discontinu, dans lequel un certain nombre de pièces sont fixées sur une table qui passe sous une tête d'usinage en diamant. Les surfaces des lits de briques ou de blocs de construction sont parfois lissées par meulage humide pour faciliter leur liaison avec des « colles » en couche mince.

2.2.8.1.2 Meulage à sec

Le meulage à sec des surfaces des lits de blocs d'argile avec un système à meule diamant est réalisé en tant que traitement ultérieur pour faciliter la liaison avec une mince couche de mortier. Dans le cas du meulage à sec, le dispositif de meulage est entièrement capoté.

2.2.8.1.3 Perçage

Les produits céramiques, et notamment les produits réfractaires, doivent parfois être percés lorsque le trou requis ne peut être obtenu avec la précision nécessaire lors des opérations de pressage et de cuisson.

2.2.8.1.4 Sciage

Il s'agit d'une opération de finition qui s'effectue lorsque la forme finale d'une brique céramique, et notamment d'une brique réfractaire, ne peut s'obtenir efficacement lors de l'étape de pressage. Dans ce cas, des briques de dimensions excessives sont pressées et cuites, puis sciées aux dimensions requises.

On peut scier des briques de parement pour fabriquer des formes spéciales « découpées et fixées ». Dans pratiquement toutes les opérations d'usinage, un circuit d'eau en boucle fermée assure la lubrification et débarrasse les surfaces de travail des particules lubrifiées - tout en minimisant les rejets de poussière.

2.2.8.2 Polissage

Dans certains cas et notamment pour des carreaux de porcelaine, on polit la surface cuite pour obtenir un carreau homogène brillant et non émaillé.

2.2.8.3 Enrichissement au carbone (produits réfractaires)

Les produits réfractaires sont amenés à fonctionner dans des environnements extrêmement hostiles et pour certaines applications, il faut imprégner les produits cuits avec un brai à base de pétrole. La présence de carbone dans le produit final offre plusieurs avantages :

- il sert de lubrifiant, au bénéfice des surfaces de travail des plaques à portes coulissantes
- la conductivité thermique relativement élevée du carbone augmente la résistance aux chocs thermiques du produit
- le carbone agit comme un filtre à pores qui réduit la perméabilité du produit, ce qui procure ensuite une résistance accrue à la pénétration de scories et de métal.

L'imprégnation avec du brai est un procédé discontinu qui s'effectue généralement dans trois récipients cylindriques verticaux équipés de couvercles à charnière. On charge les produits à traiter dans des paniers métalliques qui logent à l'intérieur des récipients. On chauffe les produits dans le premier récipient à ~ 200 °C via un flux d'air chaud en circulation, puis on transfère le panier et son contenu dans le deuxième récipient (appelé autoclave), qui possède une enveloppe chauffante pour maintenir la température. On ferme ensuite l'autoclave hermétiquement, on le met sous vide et on le remplit de brai liquide (prélevée dans des cuves de stockage en vrac maintenues à des températures d'environ 180 à 200 °C). Pour réaliser l'imprégnation, on libère le vide puis on applique de l'azote sous une pression élevée. Après drainage, on transfère le panier et son contenu dans le troisième récipient pour les faire refroidir à une température inférieure à celle à laquelle les composants volatils du brai peuvent se dégager.

Enfin, il faut éliminer un pourcentage élevé des produits volatils du brai, sous peine de nuire à l'environnement de travail lors de la mise en service des produits réfractaires. Pour ce faire, on transfère généralement les produits imprégnés dans un four, pour qu'ils y subissent un cycle de chauffage prédéfini. Le ventilateur d'évacuation du four refoule dans un dispositif d'oxydation thermique (incinérateur) maintenu à plus de 800 °C, avec un temps de séjour d'au moins 0,5 secondes. Ces conditions permettent d'assurer l'oxydation complète de tous les produits volatils du brai (hydrocarbures complexes).

Les produits ayant subi le traitement ci-dessus en ressortent recouverts de dépôts charbonneux légers et fragiles qui doivent être éliminés avant tout conditionnement ou traitement ultérieur. Cela se fait généralement par projection de grenaille sur les produits, sur une table de projection.

2.2.8.4 Polissage au tonneau des briques de parement

Pour donner un aspect vieilli à certaines briques de parement, on les fait passer dans un tambour rotatif incliné, doublé de caoutchouc. Les arêtes vives sont éliminées par attrition, ce qui adoucit le profil. Dans certains cas, on ajoute des projections de carbonate de calcium (calcaire broyé), de la suie ou des pigments afin de reproduire l'aspect de briques récupérées, dont le rôle architectural est reconnu.

2.2.9 Ajout de matériaux auxiliaires

2.2.9.1 Matériaux de jointolement (tuyaux)

La plupart des tuyaux étant installés sous terre en tant que canaux de drainage, égouts etc., il leur faut des joints fiables. L'industrie a mis au point des gaines et des joints plastiques stables.

2.2.9.2 Silicones/produits hydrofuges

Les systèmes en argile réfractaire présentent des valeurs de porosité extrêmement variées, et on a parfois recours à la pulvérisation ou au trempage des produits dans des solutions de silicone pour leur donner davantage d'imperméabilité et pour éviter le développement de substances organiques ou d'efflorescences. Cette technique s'emploie notamment pour les tuiles.

2.2.9.3 Matériaux isolants

On introduit des matériaux isolants, par exemple du polystyrène ou de la laine minérale, dans certains gros blocs d'argile creux et dans certains blocs LWA, afin d'améliorer leurs propriétés d'isolation thermique.

2.2.9.4 Encartage et placage (briques réfractaires)

Pour faciliter l'installation des produits réfractaires et la chauffe interne ou l'alignement du four, d'épaisses cartes ou plaques métalliques peuvent être collées sur une ou plusieurs surfaces des briques à cuire. Une carte agit comme un joint de dilatation, elle s'élimine en brûlant au fur et à mesure que le four est amené à sa température de fonctionnement. Les plaques métalliques fondent dans des conditions similaires, réalisant une liaison entre les briques adjacentes.

2.2.9.5 Adhésifs

On utilise des adhésifs stables (généralement à base d'époxy) pour assembler les formes spéciales découpées et fixées des raccords de tuile et des briques ou blocs d'argile.

2.2.9.6 Assemblage final

Certains produits sont achevés lors d'une étape d'assemblage final, qui consiste par exemple à monter des brides métalliques sur des isolants haute tension pour les fixer dans des douilles, des transformateurs ou d'autres applications.

2.2.10 Triage, conditionnement et stockage

Le triage et le conditionnement peuvent encore être des opérations manuelles, comme c'est le cas pour certains types de briques en argile, de tuiles et de produits réfractaires profilés, ainsi que pour la vaisselle de table et les objets décoratifs. Toutefois, un contrôle plus strict de la cuisson a permis de réduire considérablement le nombre de déchets de casse ces dernières années, et la tendance est aujourd'hui de s'orienter vers des systèmes plus automatisés. Même la couleur peut désormais être mesurée au moyen d'instruments, ce qui est important dans le cas des carreaux céramiques. Puisque leur enfournement présente très peu de déchets, les briques et blocs en argile sont consolidés mécaniquement sous forme de paquets prêts à être emballés sous film rétractable - le client acceptant la possibilité qu'il y ait 1 à 2 % d'articles imparfaits.

Les produits céramiques de forme régulière telles que les briques, les blocs, les tuyaux et les systèmes réfractaires sont généralement liés sous forme de paquets de format standard qui sont ensuite souvent emballés dans du polystyrène et peuvent être palettisés.

Les produits céramiques qui ont le plus de valeur, tels que la vaisselle de table et les objets décoratifs, exigent un examen et un tri rigoureux suivis d'un emballage de protection perfectionné. Les produits réfractaires non profilés, au contraire, sont généralement simplement pesés et ensachés puis palettisés. Pour le stockage, on utilise également des fûts métalliques.

Les carreaux céramiques sont - individuellement - assez fragiles, mais une fois emballés de façon serrée dans des cartons, ils se révèlent remarquablement robustes lors de la manutention et du transport.

Le stockage des produits de terre cuite fabriqués à grande échelle se fait souvent en extérieur, mais les produits en sacs ou en cartons doivent être stockés en entrepôt, de même que certains produits réfractaires sensibles à l'humidité.

2.2.11 Installations d'alimentation et d'évacuation (traitement des effluents gazeux et traitement des eaux de process)

Les unités de dépoussiérage et de traitement des effluents gazeux provenant des fours, les stations de traitement des eaux de process et les zones de stockage des combustibles sont des installations d'alimentation et d'évacuation importantes pour les usines de fabrication de produits céramiques. Selon les émissions de poussières, les unités de dépoussiérage sont des préséparateurs centraux ou locaux par force centrifuge, des filtres en tissu fibreux, des dépoussiéreurs humides et des électrofiltres. Selon le type d'émission, l'industrie céramique utilise des unités complémentaires de traitement des effluents gazeux, par exemple des laveurs et des installations de sorption à sec ainsi que des brûleurs de postcombustion thermiques et catalytiques. Ces unités se situent le plus souvent à proximité de la principale source d'émission, c'est-à-dire le four.

Les eaux de process issues de la fabrication des produits céramiques contiennent principalement des composants minéraux. Les unités d'épuration des eaux de process sont souvent des bassins de décantation. La décantation des composants minéraux inorganiques peut être accélérée grâce à l'utilisation d'agents de floculation et de coagulation.

Le mode de stockage du combustible dépend des caractéristiques du combustible utilisé. Le charbon en morceaux est stocké dans des systèmes de stockage à l'air libre et des entrepôts de stockage, et le charbon pulvérisé est stocké dans des silos. Le gaz de pétrole liquéfié est stocké dans des réservoirs spéciaux sous pression. Le fioul est stocké dans des cuves, le fioul lourd devant être chauffé pour pouvoir être pompé. Le gaz naturel est fourni par le réseau d'alimentation de la compagnie de gaz. Pour en savoir plus sur le stockage des combustibles, se reporter au BREF sur le stockage (ESB).

En fonction des traitements, il faut également des installations de fourniture, telles que des usines de fabrication de moules. Ces installations produisent des moules en plâtre qu'on utilise en grande quantité, par exemple, dans la fabrication des tuiles.

2.2.12 Le recyclage dans l'industrie céramique

La plupart des secteurs de l'industrie recyclent les matériaux tels que les déchets de coupe, les chutes et les articles non conformes, en les renvoyant à l'étape de préparation des matières premières. Les articles cuits de qualité inférieure peuvent également être recyclés au sein des usines, généralement à l'issue d'une opération de concassage et de criblage destinée à former une chamotte granulaire. Cette dernière est non plastique et elle peut conférer certains avantages lorsqu'on l'ajoute en proportion contrôlée à des pâtes argileuses, notamment un séchage plus facile et un retrait moins important, du fait de l'augmentation de perméabilité. Même si le recyclage des « déchets de production cuits » ne convient pas au procédé dont ceux-ci sont issus, il peut avoir son utilité dans un autre procédé céramique.

Les produits réfractaires usés qu'on enlève lorsqu'on change le revêtement d'un four peuvent être contaminés par des scories, des sels, du verre ou du métal, ce qui risque de compromettre les propriétés réfractaires de n'importe quelle pâte à laquelle ils seraient ajoutés. De même, diverses autres matières contaminées (p. ex. des matières contaminées par des métaux lourds, issues des émaux) peuvent, elles aussi, ne pas convenir au recyclage. Les moules en plâtre qui sont en fin de vie fonctionnelle constituent également un déchet de production non réutilisable, mais dans certains cas, ils peuvent servir de matière première dans l'industrie cimentière.

En revanche, dans d'autres cas - notamment pour les briques de parement et les tuiles en argile - la récupération et la réutilisation se pratiquent couramment, et les briques récupérées sont très demandées. Dans toute l'Europe, on trouve encore beaucoup de briques romaines dans les maçonneries. On notera que quelques-unes des utilisations de briques granulaires ou finement broyées peuvent s'appliquer à des calibres similaires de produits cuits issus d'autres secteurs. Les « déchets de production céramiques » concassés et calibrés s'utilisent également dans le béton de construction ou comme charge dans l'asphalte qui sert à la construction des routes.

2.2.13 Organigramme général montrant différents chemins de traitement

La figure suivante résume la description des différents procédés et illustre différents chemins possibles dans la fabrication des produits céramiques [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Raw materials	Matières premières
Auxiliary agents	Agents auxiliaires
Batching	Dosage
Recycled materials	Matières recyclées
Dry preparation of raw materials	Préparation des matières premières par voie sèche
Wet preparation of raw materials	Préparation des matières premières par voie humide
Classification	Classification
Direct granulation	Granulation directe
Spray drying	Séchage par atomisation
Filter pressing	Filtration-Pressage
Mixing and de-airing	Mélange et désaéragé
Pressing	Pressage
Plastic shaping	Façonnage plastique
Casting	Coulage
Drying	Séchage
Surface treatment	Traitement de surface
Firing	Cuisson
Product finishing / sorting / packaging	Finition du produit / triage / conditionnement
Ceramic product	Produit céramique

Figure 2.6 : Organigramme général montrant différentes voies de traitement

2.3 Description des techniques de fabrication des produits céramiques secteur par secteur

2.3.1 Briques et tuiles

Dans les deux types d'installations, briqueteries et tuileries, la fabrication des briques et des tuiles passe par les étapes d'extraction des matières premières (activité non traitée dans le présent document), de stockage des matières premières, de préparation des matières premières, de façonnage, de séchage, de cuisson et de traitements ultérieurs. Des critères spéciaux relatifs à la surface et à la couleur des produits nécessitent un traitement de surface par émaillage, engobage ou profilage. La figure ci-après présente, à titre d'exemple, une vue schématique de la fabrication des tuiles pressées [4, UBA, 2001].

Mining of raw material	Extraction de la matière première
Excavator	Excavateur
Raw material preparation	Préparation de la matière première
Box feeder	Alimentateur linéaire
Pan mill	Broyeur à meules
Double-roll crusher	Concasseur à deux cylindres
Stockpile	Case de stockage
Shaping	Façonnage
Extruding press	Presse à extruder
Revolving press	Presse revolver
Drying	Séchage
Chamber or tunnel dryer	Séchoir à chambre ou tunnel
Tunnel kiln	Four tunnel
Firing	Cuisson
Subsequent treatment	Traitements ultérieurs

Figure 2.7 : Vue schématique de la fabrication des tuiles pressées

La figure ci-après présente, à titre d'exemple, une vue schématique de la fabrication des briques de maçonnerie [20, CERAME-UNIE, 2004].

Quarrying	Extraction
Excavator	Excavateur
Box feeder	Alimentateur linéaire
Raw material preparation	Préparation de la matière première
Pan mill	Broyeur à meule
Double-roll crusher	Concasseur à deux cylindres
Stockpile	Case de stockage
Shaping	Façonnage
Extruding press and cutter	Presse à extruder et découpeuse
Drying	Séchage
Chamber or tunnel dryer	Séchoir à chambre ou tunnel
Firing	Cuisson
Tunnel kiln	Four tunnel
Quality control, packaging and storage	Contrôle qualité, conditionnement et stockage

Figure 2.8 : Vue schématique de la préparation des briques extrudées dans la fabrication des briques de maçonnerie

2.3.1.1 Matières premières

La nature géologique des argiles pour briques et tuiles utilisées dans l'industrie européenne de la céramique est extrêmement variée, celles-ci couvrant en effet un spectre stratigraphique étendu qui va du Cambrien à nos jours. La plupart des argiles pour briques et tuiles sont d'origine sédimentaire et ont été déposées sous des milieux sédimentaires très divers : sédiments sous-marins, alluviaux, fluviaux ou fluvio-glaciaires. Ces milieux sédimentaires variés influent sur la qualité minéralogique et sur la composition chimique des argiles. La composition minéralogique et chimique des argiles utilisées dans l'industrie céramique diffère considérablement entre les différents pays européens. Par ailleurs, au sein d'un même pays, des compositions très diverses peuvent être employées. Le tableau ci-après montre les gammes des compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses utilisées dans l'industrie de la brique et de la tuile dans différents pays européens [20, CERAME-UNIE, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Pays	Autriche		France		Pays-Bas		Hongrie		Italie		Grèce		Danemark		Belgique		Royaume-Uni		Suisse		Allemagne		Gamme européenne dans 11 pays	
Comp. chimique (% en poids)	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
S	0,00	1,30	0,00	0,50	<0,01	1,50	0,01	0,75	0,01	0,62			0,03	0,70	0,01	2,05	0,01	2,00	<0,01	0,50	0,01	2,00	0,00	2,05
F	0,05	0,10	0,00	0,15	0,02	0,10	0,02	0,10	0,04	0,13			0,03	0,08	0,02	0,07	0,02	0,09	0,00	0,08	0,03	0,16	0,00	0,16
CO ₂			0,0	14,0	<0,01	10,0							0,0	16,0	0,2	3,6								
SiO ₂	50,3	70,8	35,0	80,0	53,2	80,6	42,2	63,0	33,1	74,4	6,85	75,42	49,5	66,3	62,6	74,0	40,5	74,5	35,0	77,0	50,0	70,0	33,05	80,60
Al ₂ O ₃ +TiO ₂	9,6	18,8					8,6	17,6																
Al ₂ O ₃			8,0	30,0	7,3	18,1			8,1	21,0	5,85	20,22	11,7	17,9	5,5	14	9,0	24,5	7,0	29,0	7,0	20,0	5,47	30,0
Fe ₂ O ₃	4,2	8,2	2,0	10,0	2,0	8,4	2,9	7,6	2,7	7,6	2,19	39,03	4,8	7,2	2,8	4,3	3,9	11,5	2,4	10,0	1,0	8,0	1,00	11,50
MgO	0,2	3,6	0,0	5,0	0,5	2,7	1,4	4,5	0,7	7,2	0,24	12,90	1,3	2,5	0,9	1,5	0,2	6,6	<1	5,2	0,5	3,0	0,00	7,21
CaO	0,6	15,0	0,0	18,0	0,0	8,7	2,1	15,2	0,2	26,0	0,91	25,20	0,3	12,9	0,3	5,6	0,2	17,5	3,0	23,0	0,5	15,0	0,00	26,00
Na ₂ O	0,4	1,7	0,1	1,5	0,2	1,0	0,2	1,2	0,2	14,1	0,37	3,06	0,8	0,8	0,4	1,0	0,2	0,6	0,2	1,5	0,3	1,2	0,10	14,13
K ₂ O	1,7	3,0	0,1	4,5	1,3	2,3	0,6	1,3	1,4	4,3	0,11	3,19	2,9	2,9	1,5	3,0	1,6	5,9	1,0	2,7	1,0	4,0	0,10	5,90
TiO ₂			0,3	2,0	0,5	1,3			0,5	1,1	0,20	1,22	0,6	0,8	0,5	0,8	0,6	1,6	0,3	1,5	0,5	2,0	0,30	2,00
CaCO ₃											1,63	45,00												
MgCO ₃											0,50	31,00												
MnO											0,01	0,15												
C. minéralogique (% en poids)	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Quartz	21	49	0	70	39,5	71	16	32	16	54			35	50	34	65	10	55	13	55	15	60	0,00	71,00
Feldspath	5	15	rare		1	12	3	14	1	24			10	20	10	15	0	25	<1	33	1	25	0,00	33,00
Calcite	<2	26	0	30			0	14	1	41			<1	25	0	8	0	17	<1	37	1	25	0,00	41,00
Calcite + Dolomite			rare		0	20,5	0	24																
Pyrite	<2	<2			<0,01	2,8	0	2					0		0	2	0	7	0	0,7	0	2	0,00	7,00
Kaolinite	<3	10	en faible qté		5	21,5	2	13	1	26			5	15	1	5	0	40	5	26	3	40	0,00	40,00
Illite	25	60	dominante		7	20	4	21	5	42			10	20	3	15	0	40	2	40	10	50	0,00	60,00
Montmorillonite	2	25	en faible qté		3	29,5	3	18	2	34			5	20	5	43	0	10			10	50	0,00	50,00
Vermiculite			absente		7	20	2	4									0	15	2	16	-	-	0,00	20,00

Tableau 2.1 : Gammes des compositions chimiques et minéralogiques des matières premières argileuses utilisées dans l'industrie de la brique et de la tuile dans différents pays européens

La distribution granulométrique, la présence d'autres minéraux, l'étendue granulométrique et le rapport granulométrique ont tous une influence déterminante sur les propriétés de l'argile.

L'extrême diversité de la composition des matières premières entraîne une forte variation des propriétés des produits céramiques et des émissions gazeuses produites par la cuisson. Chacune de ces argiles, ou des mélanges de celles-ci, servent à fabriquer des tuiles, des briques de parement et des blocs extrudés. La plupart des usines possèdent leur propre argilière, ce qui contribue au caractère spécifique des techniques de fabrication utilisées pour les différents types de produits.

Une analyse du fluorure et du soufre a été effectuée, ces derniers ayant une influence sur l'émission produite au cours de la cuisson, comme l'explique la section 3.3.1.1 relative aux données sur les émissions. Le fluorure, présent dans la structure des minéraux argileux, peut aller jusqu'à 1600 ppm dans l'ensemble de l'Europe et varie considérablement d'un pays à l'autre. A titre d'exemple, la figure ci-après montre une distribution de fréquence normale de la teneur en fluorure dans 312 échantillons d'argiles provenant de toutes les zones géographiques de l'Italie [3, CERAME-UNIE, 2003].

Sample number	Nombre d'échantillons
Concentration ppm	Concentration en ppm

Figure 2.9 : Distribution de la teneur en fluorure dans les argiles italiennes

La plupart des argiles contiennent des traces de chlore. La figure ci-après montre un exemple de distribution de la teneur en chlore dans les argiles italiennes [30, TWG Ceramics, 2005].

Sample number	Nombre d'échantillons
Concentration ppm	Concentration en ppm

Figure 2.10 : Distribution de la teneur en chlore dans les argiles italiennes

Les variations considérables de la teneur en soufre dans les matières premières utilisées, non seulement entre les différents pays européens mais également au sein d'un même pays, entraînent des variations importantes dans les émissions des procédés. Dans les matières premières, le soufre se trouve principalement à l'état de sulfures (pyrite). D'après des études italiennes, le soufre présente une distribution log-normale, comme le montre la figure ci-après [3, CERAME-UNIE, 2003].

Sample number	Nombre d'échantillons
Concentration ppm	Concentration en ppm

Figure 2.11 : Distribution de la teneur en soufre dans les argiles italiennes

On trouve des variations importantes non seulement dans la valeur de la teneur en soufre, mais également dans sa distribution. Ce résultat est mis évidence par l'exemple des argiles utilisées en Allemagne, au Royaume-Uni et en Belgique, comme le montre la figure suivante. Plus de 80 % des argiles allemandes contiennent des quantités de soufre généralement considérées comme faibles et moyennes alors qu'en Belgique et au Royaume-Uni, plus de 75 % sont des argiles à moyenne et haute teneur en soufre [3, CERAME-UNIE, 2003].

Concentration ranges 'wt-%S' in raw material	Gammes de concentration dans la matière première (en % en poids de S)
--	---

Figure 2.12 : Teneur en soufre des argiles

Une autre matière importante dans laquelle il existe également de fortes variations est l'oxyde de calcium (CaO), présent principalement sous forme de calcite et/ou dans la structure minérale de l'argile. La présence de CaCO_3 agit comme un « agent porogène » du fait de la décarbonatation qui se produit au cours de la cuisson. Le dégagement de HCl, de SO_x et de fluorure peut être influencé par la présence de CaO en raison de la formation de CaSO_4 et de CaF_2 . En revanche, la concentration de fluorure, de SO_x et de HCl dans les effluents gazeux n'est pas nécessairement liée au taux de CaO dans les matières premières et dépend également de la température de cuisson et de la présence de vapeur d'eau lors de la cuisson [23, TWG Ceramics, 2005].

On utilise des composés organiques, des phosphates et de la soude comme plastifiants pour les matières premières argileuses. La mousse de polystyrène, les liants papier, la sciure de bois et des matières inorganiques comme le kieselguhr et la perlite sont nécessaires en tant qu'agents porogènes. L'engobe, utilisé comme traitement de surface, est souvent fabriqué avec de l'argile cuisant blanc, des fondants ou des oxydes colorants. L'émaillage est fait de mélanges de matières granulaires (ex. Al_2O_3 , farine de quartz, craie, MgCO_3), de fondants, d'argile et d'oxydes colorants ou de frittés.

Les matières premières sont stockées à l'air libre ou dans des entrepôts de stockage, des alimentateurs gros volume, des silos de mélange, des installations d'enfossage et de maturation ou des silos à matières sèches. Les briqueteries sont souvent situées à proximité immédiate des carrières où sont extraites les matières premières.

2.3.1.2 Préparation des matières premières

Dans la fabrication des tuiles et des briques, on applique la préparation par voie sèche et la préparation par voie semi-humide. On choisit la méthode de préparation en fonction des matières disponibles, de la qualité exigée pour le produit final, de la méthode de façonnage et du rendement économique.

La préparation par voie sèche s'emploie principalement lorsqu'on utilise des matières premières relativement sèches et de faible plasticité, ou s'il est précisé que les produits doivent être de haute qualité. La préparation par voie sèche consiste à réduire la granulométrie dans des broyeurs à marteaux ou des broyeurs à rouleaux suspendus tout en séchant les particules jusqu'à ce qu'elles aient une teneur en eau de trois à six pour cent. Les additifs nécessaires sont également ajoutés lors de cette étape ; on peut par exemple ajouter de la chaux éteinte à l'argile (de 3,3 à 0,6 %) pour réguler et fixer la teneur en eau et pour conserver une plasticité suffisante pour faciliter la découpe du boudin d'argile lors d'un procédé de type extrusion. On privilégie la préparation par voie sèche dans la fabrication des briques industrielles ou de parement, du fait que les matières premières des briques de parement, telles que l'argile schisteuse, ont un faible taux d'humidité au niveau de l'argilière, ce qui les rend particulièrement adaptées à cette méthode de préparation.

Une deuxième méthode de préparation utilisée en briqueterie et en tuilerie est la préparation par voie semi-humide. Le dosage s'effectue au moyen d'alimentateurs gros volume. Ces alimentateurs à haute capacité permettent de charger en vrac et de doser plusieurs matières premières. Dans de nombreux cas, on ajoute de l'eau de malaxage au mélange à l'extrémité de l'alimentateur jusqu'à ce que la teneur en eau soit d'environ 20 %. Un concassage progressif des matières dures produit une granulométrie maximale inférieure à 1,8 mm. Les produits minces, par exemple les tuiles, ont une granulométrie comprise entre 0,5 et 0,8 mm. Selon les caractéristiques des matières premières, on utilisera des concasseurs d'argile, des concasseurs à lame, des concasseurs à deux cylindres ou des broyeurs à meules par voie humide. On peut parfois préparer du sable et l'ajouter à part ; pour ce faire, on utilise des concasseurs à mâchoires, des concasseurs à percussion, des concasseurs verticaux à percussion et des tamis. Dans certains cas, le sable et l'argile sont stockés séparément et mélangés juste avant le façonnage.

La combinaison des procédés de mélange et de pétrissage permet d'homogénéiser la masse pour obtenir une bonne plasticité. Pour ce faire, on emploie un déchiqueteur à argile, un mélangeur à deux hélices, un pétrin à tamis et un mélangeur à filtre. Pour fabriquer des briques à faible conductivité thermique, on ajoute des agents porogènes organiques et inorganiques pour obtenir un gros volume poreux. Lors de cette étape du procédé, la masse acquiert une teneur en eau définitive de 20 à 22% pour le façonnage. De l'eau chaude ou de la vapeur chaude facilitent la dissolution et l'ouverture de petites particules lors du mélange.

Les masses préparées sont stockées dans des alimentateurs gros volume, des silos à argile, des silos de mélange, des installations d'enfossage et de maturation pour être ensuite homogénéisées.

2.3.1.3 Façonnage

On emploie différentes méthodes de façonnage telles que le pressage, l'extrusion et le moulage à pâte molle (voir sections 2.2.4.2, 2.2.4.3 et 2.2.4.4) selon le type de masse, la teneur en eau et le produit souhaité.

Dans la pratique, la matière première préparée par voie semi-humide est principalement façonnée dans des presses. La masse est pressée à une pression comprise entre 0,6 et 1,5 MPa dans des presses d'extrusion avec ou sans chambre à vide. La filière transforme la masse en boudin. Ce boudin est découpé en morceaux unitaires par une découpeuse à fil. C'est la méthode de traitement la plus employée dans la fabrication des briques de construction et des tuiles extrudées.

Pour fabriquer des tuiles pressées, on commence par former un gâteau ou une motte. A l'issue de cette opération, on met en forme ces gâteaux dans une autre presse pour leur donner la forme géométrique souhaitée. Pour ce faire, on emploie des presses revolver mécaniques ou hydrauliques, des presses à enclume, des presses à broche pivotante et des presses à plateau tournant. Les plus utilisées sont les presses revolver à un ou plusieurs moules. Dans une presse revolver, un tambour à rotation intermittente ayant la forme d'un prisme à cinq, six ou huit faces comporte sur chacune de ses faces un moule à presse inférieur. Chaque fois que le tambour s'arrête, le piston vertical qui porte le moule supérieur descend dans le moule inférieur situé directement en dessous et presse la motte d'argile pour lui donner sa forme. Ensuite, le produit est placé sur un support spécial. On utilise différents types de moules ouverts, notamment des moules en plâtre, des moules en fonte lubrifiés, des moules doublés de caoutchouc ou des moules métalliques doublés de caoutchouc vulcanisé.

La surface visible des tuiles est en partie engobée ou émaillée. Les briques et les briques de parement sont traitées par profilage, exfoliation, brossage ou sablage pour créer des surfaces texturées.

2.3.1.4 Séchage, émaillage et engobage

Le procédé de séchage emploie différents types de séchoirs (voir section 2.2.5), selon la quantité de travail, le degré de mécanisation et la sensibilité de la masse. En briqueterie, ce sont généralement des séchoirs à chambres et des séchoirs tunnels. En tuilerie, on utilise aussi des séchoirs à chambres et des séchoirs tunnels. Dans les séchoirs tunnels et les séchoirs rapides, les conditions de séchage des briques vont de moins de 8 heures jusqu'à 72 heures à une température d'environ 75 à 90 °C. Les séchoirs rapides fonctionnent avec des durées nettement plus courtes, inférieures à 8 heures pour les blocs, certaines briques de parement pouvant nécessiter jusqu'à 72 heures. Dans les séchoirs à chambres, la durée de séchage des briques peut aller jusqu'à 40 heures à une température d'environ 90 °C [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]. Les tuiles sont séchées dans des séchoirs tunnels ou des séchoirs à chambres, à une température de 60 à 90 °C pendant 12 à 48 heures. La teneur en eau des produits avant leur cuisson dans un four tunnel est inférieure à trois pour cent. Les séchoirs sont chauffés principalement par la chaleur résiduelle du four et, dans certains cas, par des brûleurs à gaz naturel ou à fioul ou par cogénération.

Parfois, on émaille ou on engobe les tuiles et les briques de parement sur la partie visible ou sur la totalité de leur surface, pour leur donner des couleurs spéciales ou pour augmenter la densité du produit. On applique l'émail ou l'engobe sur la pâte après le séchage. Dans certains cas, l'engobage ou l'émaillage se font après le façonnage. L'engobe est une composition constituée d'argile, de fondants, de charge et de pigments. La meilleure façon d'en appliquer de grandes quantités sur les produits est la pulvérisation.

On ajoute des agents liants organiques à l'engobe pour obtenir une meilleure liaison entre l'engobe liquide et la surface à traiter. L'émail est un mélange de matières dosées, de fondants, d'argile et d'oxydes colorants, qu'on transforme par frittage en une masse vitreuse. L'émail est généralement appliqué par pulvérisation dans une chambre de pulvérisation.

2.3.1.5 Cuisson

A l'heure actuelle, on fait cuire les briques et les tuiles dans des fours tunnels et principalement sous atmosphère oxydante. Une période de réduction dans le secteur final de cuisson permet d'obtenir, si nécessaire, des effets de couleur spéciaux. Lors de cette période de réduction, le combustible alimente une atmosphère pauvre en oxygène. Ainsi, les matières premières utilisées produisent les effets de couleur souhaités sur les briques.

Les produits à cuire passent dans le four sur une série de wagonnets. Les briques crues sont placées directement sur le wagonnet du four tunnel, tandis que les tuiles crues sont empilées pour la cuisson au four tunnel classique dans des cassettes (en H ou en U). L'agencement des cassettes dépend du produit spécifique pour garantir une circulation optimale des gaz de cuisson chauds autour du produit et pour obtenir ainsi un bon résultat à la cuisson. Les produits à cuire sont chauffés à une température de maturation comprise entre 800 et 1300 °C.

A l'issue du délai de formation nécessaire de la pâte, entre deux et cinq heures à une température de maturation, on fait refroidir le produit comme prévu jusqu'à 50 °C.

Le temps de cuisson des tuiles dans un four tunnel se situe entre 10 et 40 heures, les briques de pavage cuisent de 45 à 60 heures et les blocs d'argile de 17 à 25 heures. La température des effluents gazeux dépend du point de rosée (et donc de la composition) de celui-ci ; par exemple, pour des argiles à haute teneur en soufre, le point de rosée sera plus élevé, de même que la température des effluents gazeux. Le tableau ci-après présente des paramètres de fonctionnement des fours tunnels classiques [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [27, VDI, 2004], [21, Almeida, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Fours tunnels	Unité	Briques de parement et briques de pavage en argile	Blocs d'argile	Blocs d'argile à perforation horizontale	Tuiles
Débit	t/h	1 - 15	3 - 15	3 - 15	3 - 6
Longueur du four	m	35 - 160	60 - 120	60 - 120	80 - 140
Section	m ²	1,3 - 6,0	4 - 12	4 - 12	4 - 10
Densité d'enfournement	kg/m ³	650 - 1500	350 - 500	250 - 750	200 - 400
Température de cuisson	°C	1000 - 1300	900 - 1050	950 - 1050	1000 - 1150
Besoin énergétique spécifique (séchage + cuisson)	kJ/kg	1600 - 3000	1000 - 2500 ^{*)}	1000 - 2500	1600 - 3500
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	5000 - 20000	10000 - 50000	10000 - 50000	10000 - 40000
Température des effluents gazeux	°C	100 - 230	100 - 300	100 - 150	170 - 200

^{*)} y compris la quantité de chaleur de l'agent porogène

Tableau 2.2 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels

La méthode de cuisson rapide dans un four à rouleaux est une alternative à la technologie classique de cuisson au four tunnel. L'introduction de la cuisson à plat sur un étage, en tuilerie, a permis de réduire le temps de cuisson et de réduire le rapport de masse des auxiliaires de cuisson. Cette méthode permet en partie, dans certains cas, de réduire la consommation d'énergie au cours du procédé de cuisson.

La méthode de cuisson rapide s'effectue dans des fours plus petits - par opposition aux gros fours tunnels classiques. Ces unités plus petites procurent une plus grande souplesse dans l'adaptation des paramètres de cuisson au produit réel. La densité d'enfournement des fours à cuisson rapide peut être inférieure à 100 kg/m³. Le tableau suivant présente certains paramètres, en tuilerie, relatifs aux fours tunnels classiques et aux méthodes de cuisson rapide [4, UBA, 2001].

Type de four	Rapport de masse auxiliaires de cuisson/ produits à cuire	Temps de cuisson (h)
Four tunnel classique	6:1	~50
Four de précision à cuisson rapide	3:1	~10
Four Kéramono à un étage	1:1	~2
Four à rouleaux	de 0:1 à 2:1	de 3 à 8

Tableau 2.3 : Comparaison entre les fours tunnels classiques et les méthodes de cuisson rapide (en tuilerie)

L'applicabilité de la méthode de cuisson rapide en briqueterie et en tuilerie dépend essentiellement de la surface spécifique du produit et de la possibilité d'une pénétration par les gaz de cuisson chauds. La méthode de cuisson rapide permet de fabriquer non seulement des tuiles, mais également des blocs d'argile tels que des briques alvéolées. Le tableau ci-après montre les plages de paramètres de fonctionnement des fours tunnels à cuisson rapide [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Fours tunnels à cuisson rapide	Unité	Blocs d'argile	Briques de parement	Tuiles pressées
Débit	t/h	16,60 - 18,75	2,1 - 5,4	1,9 - 5,4
Longueur du four	m	130	90 - 120	80 - 125
Section	m ²	jusqu'à 17,6	jusqu'à 3,5	jusqu'à 3,3
Densité d'enfournement	kg/m ³	n.a.	n.a.	n.a.
Température de cuisson	°C	1000	1000 - 1080	1020 - 1150
Temps de cuisson	h	2,5 - 3,5	4 - 5	3 - 4
Besoin énergétique spécifique (séchage + cuisson)	kJ/kg	1250 - 3500	1590 - 4500	2930 - 4605

Tableau 2.4 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels à cuisson rapide

Pour fabriquer des produits spécialisés, par exemple des briques de parement façonnées à la main et de couleur spéciale, on utilise également des fours Hoffmann. Ces fours sont constitués d'une série de chambres reliées, qui sont successivement remplies de briques séchées, fermées hermétiquement, mises en cuisson quasi continue et où les gaz chauds sont attirés d'une chambre dans la suivante. Ce système de liaison, avec des conduits de fumée et des orifices entre les chambres, permet également de préchauffer les produits et de refroidir les effluents gazeux. Un cycle de cuisson dure généralement de trois jours à deux semaines et les densités d'enfournement des chambres reliées dépassent 300 kg/m^3 . Aujourd'hui, ces fours fonctionnent principalement au gaz, mais une alimentation par le dessus, au fioul ou au charbon, se pratique occasionnellement et produit des briques avec effets de vieillissement [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

Les fours intermittents peuvent être utilisés pour fabriquer des tuiles, briques ou raccords spéciaux, et généralement pour des fournées moins importantes. Ces fours fonctionnent de manière discontinue et ont des temps de cuisson qui vont de 20 à 45 heures, des températures de cuisson comprises entre 1000 et 1100 °C et des besoins énergétiques spécifiques d'environ 500 à 900 kJ/kg [23, TWG Ceramics, 2005].

Les fours tunnels classiques sont principalement chauffés au gaz naturel ou au fioul et les fours à cuisson rapide sont chauffés au gaz naturel. Dans certains cas, comme indiqué ci-dessus, on peut utiliser du coke de pétrole et de la tourbe.

2.3.1.6 Traitements ultérieurs

Selon les résultats de la cuisson, les produits sont triés soit automatiquement soit manuellement lors du déchargement du four ou du wagonnet. Les produits tels que les briques calibrées sont traités dans des machines à rectifier.

On applique parfois aux briques de parement en argile, aux tuiles en argile ou aux raccords un traitement par agent hydrophile ou agent hydrophobe (p. ex. le siliconage ou la lanolinisation) qui modifie le comportement de leur surface lorsqu'on la mouille avec de l'eau.

On emballage les tuiles et on les palettise pour les transporter vers un centre d'expédition. On place une feuille de papier, de carton ou de bois entre chaque couche de tuiles et une fois les palettes pleines, on les emballage par thermorétraction ou on les enserre dans un film. La manutention des produits se fait par chariot élévateur, grue mobile ou grue sur portique.

2.3.1.7 Flux d'entrée et de sortie en briqueterie et en tuilerie

Les principaux flux d'entrée et de sortie du procédé de fabrication des briques et tuiles sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG, solid fuels	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL, combustibles solides
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> pore-forming agents, (plaster), sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> agents porogènes, (plâtre), agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, additives	<u>Matières premières</u> argiles, additifs
Manufacture of bricks and roof tiles	Fabrication des briques et des tuiles
Bricks, roof tiles	Briques, tuiles
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC), (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV), (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, (used plaster moulds), sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, (moules en plâtre usagés), boues, déchets de casse, déchets d'emballage, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.13 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des briques et des tuiles

2.3.2 Tuyaux en grès

Les tuyaux en grès sont fabriqués selon les étapes de procédé suivantes : stockage des matières premières, préparation des matières premières, façonnage, séchage, émaillage, cuisson et traitements ultérieurs. La figure ci-après montre une vue schématique de la fabrication des tuyaux en grès [4, UBA, 2001].

Storage of chamotte	Stockage de la chamotte
Storage of clay	Stockage de l'argile
Storage of glaze loam	Stockage de l'argile à émail
Proportioning	Dosage
Milling	Broyage
Storage	Stockage
Mixing	Mélange
Pressing	Pressage
Drying	Séchage
Glazing	Emaillage
Firing	Cuisson
Sorting	Triage
Socket and spigot end treatment	Traitement des manchons et embouts
Packaging	Conditionnement
Product storage	Stockage des produits
Shipping	Expédition

Figure 2.14: Vue schématique de la fabrication des tuyaux en grès

2.3.2.1 Matières premières

Dans la fabrication des tuyaux en grès, les matières premières employées sont l'argile, la chamotte et l'émail. L'émail est constitué d'un mélange de terre, d'argile, de craie, de dolomite, de quartz et d'oxydes métalliques. Les matières premières de la chamotte, qui sont principalement constituées de matières réutilisées issues du procédé de fabrication des céramiques, et la terre pour l'émail sont stockées sous abri. Selon le procédé de préparation, les composants argileux sont stockés à l'air libre ou dans des caissons.

Le tableau 2.5 et le tableau 2.6 montrent les gammes de composition minéralogique et chimique des argiles utilisées dans la fabrication des tuyaux en grès [3, CERAME-UNIE, 2003].

Paramètre (% en poids)	BE	DE	IT	NL	UK
Quartz					
mini	24	8	35	40	21
maxi	45	25	50	50	33
Feldspath					
mini	11	1	1	0	0
maxi	18	4	24	0	0
Kaolinite					
mini	24	30	5	20	8
maxi	32	60	20	25	20
Illite					
mini	16	10	12	20	40
maxi	37	40	30	25	56
Montmorillonite					
mini	0	2	0,5	0	0
maxi	8	10	1	0	0

Tableau 2.5 : Composition minéralogique de l'argile dans la fabrication des tuyaux en grès

Paramètre (% en poids)	BE	DE	IT	NL	UK
S					
mini	0,02	0,0	0,01	0,01	0,01
maxi	0,05	0,2	0,62	0,05	0,10
F					
mini	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02
maxi	0,05	0,06	0,13	0,04	0,05
CO ₂					
mini	0,1			0,05	0,50
maxi	0,3			0,25	1,50
SiO ₂					
mini	60	55	60	65	55
maxi	81	70	75	72	63
Al ₂ O ₃					
mini	15	20	15	18	17
maxi	27	35	23	23	22
Fe ₂ O ₃					
mini	1,0	1,0	5,0	1,5	6,0
maxi	7,4	10	7,0	4,5	8,0
MgO					
mini	0,2	0,0	0,7	0,5	1,7
maxi	1,0	1,5	1,5	1,4	2,2
CaO					
mini		0,0		0,2	0,3
maxi		0,8		0,5	0,6
Na ₂ O					
mini	0,1	0,0	3,0	0,1	0,3
maxi	0,3	0,4	7,0	0,6	1,1
K ₂ O					
mini	1,0	1,0	1,0	1,8	2,8
maxi	2,6	4,0	3,0	2,6	3,9
TiO ₂					
mini	1,3	1,0	0,5	0,7	0,9
maxi	1,8	2,5	1,0	1,3	1,0

Tableau 2.6 : Composition chimique de l'argile dans la fabrication des tuyaux en grès

2.3.2.2 Préparation des matières premières

Pour la préparation de l'argile, différents procédés sont utilisés, notamment la barbotine. L'argile est introduite dans les quantités requises par des alimentateurs linéaires dans le procédé de préparation. Un broyage fin est effectué par différents types de broyeurs, par exemple des broyeurs Alsing ou des broyeurs à cylindres. Les broyeurs Alsing servent également au broyage fin des composants de l'argile à émail. Ces composants sont broyés à une finesse de 0,06 mm. A l'issue de cette étape, les particules les plus grosses sont éliminées par criblage. Les composants les plus fins sont mis en suspension dans de l'eau et stockés dans des cuves agitées.

La chamotte crue est concassée et broyée dans des concasseurs à mâchoires, des concasseurs à cône, des broyeurs à percuteurs ou des broyeurs à boulets. La fraction d'un calibre maximal de 2,5 mm est éliminée par criblage et stockée. La chamotte sert d'agent porogène et confère à la masse la résistance et la stabilité nécessaires pendant la cuisson. Les fractions d'argile et de chamotte sont introduites dans l'unité de mélange par gravimétrie, via un convoyeur à bande et des balances à chamotte ou par voie volumétrique, par des alimentateurs linéaires, des convoyeurs à bande ou des distributeurs rotatifs.

Dans l'unité de mélange, on malaxe les composants et on leur ajoute de l'eau pour obtenir une humidité de pressage approximative avec une teneur en eau comprise entre 15 et 20 %. Si nécessaire, on ajoute à la masse de pressage des agents de pressage organiques et inorganiques et des plastifiants. La masse humide ainsi préparée est stockée et homogénéisée dans des distributeurs gros volume, des silos à argile, des entrepôts de stockage ou des installations d'enfossage et de maturation correctement mécanisées.

2.3.2.3 Façonnage

On façonne les tuyaux en argile crue dans des extrudeuses sous vide horizontales et verticales. On comprime la masse de pressage et on la désaère dans la chambre de désaération de l'extrudeuse, puis on façonne le tuyau, ainsi que les manchons et les embouts. On nettoie ensuite les manchons et embouts.

La manutention des tuyaux en pâte crue se fait à l'aide d'appareils spéciaux tels que des robots à adhérence sous vide. Ces robots placent les produits crus sur les wagonnets de séchage. Le procédé de façonnage des tuyaux en argile se distingue par la masse de pressage, les différents diamètres de tuyau et le fonctionnement périodique de l'extrudeuse.

2.3.2.4 Séchage et émaillage

Le séchage sans rupture des produits crus s'opère dans des séchoirs à chambres ou tunnels, à des températures pouvant atteindre 100 °C et à environ deux pour cent d'humidité résiduelle. Le temps de séchage des raccords est entre 70 et 100 heures, celui des tuyaux se situant entre 30 heures (pour les petits tuyaux) et neuf jours (pour les gros). Il faut une atmosphère contrôlée (température, humidité) pour éviter une déformation des tuyaux, provoquée par un retrait inégal.

Des robots préhenseurs spéciaux trempent les produits crus séchés dans la cuve à émail pour recouvrir la pâte d'émail, l'émaillage pouvant aussi se faire par pulvérisation. Lors de la cuisson, l'émail fusionne avec la surface de la pâte, l'enveloppe et la recouvre d'une surface lisse. Si certaines parties de la surface doivent être sans émaillage, elles doivent être recouvertes de paraffine avant l'émaillage.

Une fois émaillés, les articles crus sont posés sur des wagonnets de four. Ensuite, ils sont séchés finalement pour atteindre moins d'un pour cent d'humidité résiduelle dans des séchoirs tunnels qui se trouvent devant les fours tunnels.

2.3.2.5 Cuisson

La cuisson a lieu dans des fours tunnels chauffés au gaz et essentiellement sous atmosphère oxydante. Les articles crus cuisent en position verticale, fixés sur des auxiliaires de cuisson. Les températures classiques de cuisson s'échelonnent entre 1150 et 1250 °C, le temps de cuisson étant de 30 à 80 heures. Le tableau suivant présente les plages de paramètres de fonctionnement des fours tunnels utilisés pour la fabrication des tuyaux en grès [4, UBA, 2001].

Fours tunnels	Unité	Tuyaux en grès
Production	t/h	1 - 6
Longueur du four	m	80 - 180
Section	m ²	6 - 10
Densité d'enfournement	kg/m ³	150 - 300
Température de cuisson	°C	1100 - 1200
Besoin énergétique spécifique (séchage + cuisson)	kJ/kg	3000 - 4000
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	4000 - 18000
Température des effluents gazeux	°C	160 - 200

Tableau 2.7 : Plages de paramètres de fonctionnement des fours tunnels

Une alternative à la cuisson classique est la méthode de cuisson rapide des tuyaux en grès. Ces tuyaux en grès sèchent en dix heures et sont émaillés par pulvérisation. Ils passent ensuite au four pendant une durée de huit heures. Les tuyaux cuisent tout en avançant sur des rouleaux horizontaux. Les raccords, par exemple les branchements et les arcs, sont également fabriqués par la méthode de cuisson rapide. Comme les tuyaux à cuisson rapide, ils passent dans le four à rouleaux pendant une durée de huit à onze heures. Le transport des raccords s'effectue sur des auxiliaires de cuisson spéciaux qui sont renvoyés au cours d'un cycle sous le four.

2.3.2.6 Traitements ultérieurs

À l'issue de la cuisson, tous les produits sont contrôlés. Si nécessaire, des éléments d'étanchéité en polymère ou des joints préfabriqués sont rajoutés aux manchons et embouts. Après cette étape, les tuyaux et les raccords sont conditionnés.

Après fixation des éléments d'étanchéité, les tuyaux d'un certain calibre (de DN 250 à DN 600) sont traités par meulage, pour garantir une précision maximale des manchons et embouts.

2.3.2.7 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des tuyaux en grès

Les principaux flux d'entrée et de sortie du procédé de fabrication des tuyaux en grès sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> wetting agents, seals, sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> agents mouillants, joints, agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, opener, glaze	<u>Matières premières</u> argiles, agent porogène, émail
Manufacture of vitrified clay pipes	Fabrication des tuyaux en grès
Clay pipes, fittings	Tuyaux en grès, raccords
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC), (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV), (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.15 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des tuyaux en grès

2.3.3 Produits réfractaires

Les produits réfractaires sont classés en fonction de leur composant principal. Les groupes principaux sont les suivants :

- les produits à haute teneur en alumine, groupe 1 ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 56 \%$)
- les produits à haute teneur en alumine, groupe 2 ($45 \% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 56 \%$)
- les produits en argile réfractaire ($30 \% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 45 \%$)
- les produits en argile réfractaire à basse teneur en alumine ($10 \% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 30 \%$, $\text{SiO}_2 < 85 \%$)
- les produits siliceux ou les produits de semi-silice ($85 \% < \text{SiO}_2 < 93 \%$)
- les produits de silice ($\text{SiO}_2 > 93 \%$)
- les produits basiques à base de magnésie, magnésie-chrome, chrome-magnésie, chromite, forstérite, dolomite
- les produits spéciaux à base de carbone, graphite, zircon, zircone, carbure de silicium, carbures (autres que le carbure de silicium), nitrures, borures, spinelles (autres que la chromite), chaux fondue.

L'industrie réfractaire emploie différentes méthodes pour la fabrication des briques. Le procédé le plus simple consiste à scier des formes dans des matières premières naturelles ou artificielles. Pour fabriquer des produits coulés par fusion, on coule des bains dans des moules afin que ces bains se solidifient pour former des blocs ou des briques. De nos jours, les produits hautement réfractaires se fabriquent de plus en plus souvent par broyage fin et par mélange humide, les produits réfractaires étant ensuite façonnées par extrusion, coulage en barbotine ou pressage isostatique. Toutefois, on privilégie aujourd'hui la méthode dite de céramique lourde pour fabriquer les briques réfractaires. Le procédé de fabrication passe par les étapes de stockage des matières premières, de préparation des matières premières, de façonnage, de séchage, de cuisson et de traitements ultérieurs. La figure ci-après présente une vue schématique de la fabrication de briques basiques contenant du minerai de chrome [4, UBA, 2001].

Storage of sintered magnesite	Stockage de la magnésite frittée
Storage of chromium iron ore	Stockage du minerai de fer chromé
Proportioning	Dosage
Milling	Broyage
Storage	Stockage
Mixing	Mélange
Pressing	Pressage
Drying	Séchage
Glazing	Emaillage
Firing	Cuisson
Sorting	Triage
Product storage	Stockage des produits
Shipping	Expédition

Figure 2.16 : Vue schématique de la fabrication de briques basiques contenant du minerai de chrome

2.3.3.1 Matières premières

L'argile, la chamotte et des roches naturelles telles que la quartzite, la dolomite, la magnésite et la bauxite, qui peuvent être calcinées (voir section 2.2.2.8), ainsi que des matières synthétiques de base, par exemple le corindon fritté, le carbure de silicium, la mullite fondue ou les spinelles, servent de matières premières pour les produits réfractaires. Afin d'obtenir des masses compressibles, on ajoute des liants et des granulats aux matières premières broyées. Il existe des types extrêmement différents de liants et de granulats utilisés, par exemple le lait de kaolin, le lignosulfite, le brai de houille, le naphthalène, la résine synthétique, le lait de chaux, la cire, l'acide phosphorique, la suie, le graphite et le soufre. Ces matières premières sont stockées dans des caissons sous abri. Les matières premières qui sont livrées prébroyées sont stockées dans des silos pour éviter une réaction entre l'eau et les matières premières.

Le tableau suivant montre les oxydes les plus couramment utilisés pour les opérations de fonte/coulage des produits réfractaires, avec les températures de fusion correspondantes [3, CERAME-UNIE, 2003].

Nom	Formule	Température de fusion (°C)
Alumine	Al_2O_3	2050
Chrome III	Cr_2O_3	2275
Magnésie	MgO	2830
Dolomite	$\text{CaO} + \text{MgO}$	2700
Silice	SiO_2	1725
Zircone	ZrO_2	2700
Zircon	ZrSiO_4	1770

Tableau 2.8 : Oxydes les plus utilisés dans les opérations de fonte/coulée

2.3.3.2 Préparation des matières premières

Les matières premières sont essentiellement concassées au cours d'un procédé de concassage grossier puis d'un concassage fin. Le concassage grossier est réalisé par des concasseurs à mâchoires, des concasseurs à percussion, des concasseurs à cylindres et des concasseurs à cône. Le broyage fin est réalisé dans des broyeurs à cylindres, des broyeurs à boulets et des broyeurs vibrants. Les matières premières concassées et broyées sont classées selon différentes fractions par des tamis vibrants. Les matières de trop gros calibre sont renvoyées vers les unités de broyage. Les fractions sont stockées provisoirement dans des silos, qui sont des lieux d'entreposage entre l'étape de préparation et la fabrication des briques. Le dosage est effectué au moyen de balances de pesage. Si nécessaire, on rajoute des liants, des agents porogènes, des agents anticollants et des lubrifiants pour moules. Les différents composants sont introduits dans des mélangeurs (principalement dans des mélangeurs à fonctionnement périodique), homogénéisés et prédensifiés. Les mélangeurs à meules, les mélangeurs à contre-courant et les mélangeurs à deux hélices se sont montrés adaptés.

La barbotine de coulée s'obtient en mélangeant les matières premières avec un agent dispersant tel que de l'eau. La « poudre de pressage » se fabrique au moyen d'un procédé par voie sèche ou d'un procédé par voie humide ou semi-humide, suivi d'un séchage par atomisation.

2.3.3.3 Façonnage

Pour le façonnage, on emploie de la barbotine de coulée et de la « poudre de pressage ». On verse la barbotine de coulée dans des moules au cours du procédé de coulée. Après avoir laissé le temps à la pâte de se former, on démoule le produit cru.

Auparavant, pour donner à la « poudre de pressage » la forme souhaitée, on la façonnait dans des presses à genouillère. Aujourd'hui, celles-ci sont remplacées par des presses hydrauliques équipées des commandes électroniques perfectionnées. Ces presses contrôlent les briques en permanence et procèdent aux réglages nécessaires. Aujourd'hui, la force de pressage spécifique normale est de 80 à 200 MPa. Grâce aux différents programmes de la presse, les briques réfractaires peuvent être adaptées aux exigences de la clientèle.

La méthode par pressage isostatique est acceptée pour la fabrication de produits réfractaires spéciaux haut de gamme. Dans cette méthode, on remplit des moules en plastique souple avec un mélange d'une fine poudre céramique. Après avoir refermé le moule, on soumet ce mélange à une pression, généralement dans un autoclave hydraulique. Cette pression est appliquée de façon uniforme et dans toutes les directions sur la forme pressée, par l'intermédiaire d'un liquide compressif, ce qui permet d'obtenir une densification uniforme. Ce procédé permet d'appliquer des pressions pouvant aller jusqu'à 300 MPa pour fabriquer des blocs grand format et des formes spéciales.

Des mélanges céramiques de qualités diverses peuvent être compactés pour créer des formes par l'application d'une pression relativement basse conjuguée avec des oscillations mécaniques créées par des vibreurs. Depuis peu, le procédé de façonnage classique est complété par un nouveau procédé. Les mélanges à façonner sont mélangés avec un liant sensible au froid. Les mélanges sont ensuite versés dans des moules et durcissent à des températures inférieures à -30 °C.

2.3.3.4 Séchage

Le séchage s'effectue dans des séchoirs tunnels ou des séchoirs à chambre et dure, selon la taille des briques, entre une journée et plusieurs semaines. Les formes de grande dimension sont séchées sous humidité contrôlée de l'air de séchage. L'humidité résiduelle doit être inférieure à un pour cent avant que la cuisson ne commence. Le tableau ci-après présente des exemples de paramètres de fonctionnement des séchoirs à fonctionnement périodique, qui sont de moins en moins utilisés dans l'industrie réfractaire [4, UBA, 2001].

Séchoirs à chambres	Unité	Produits d'argile réfractaire	Produits de silice
Production	t/cycle	18	10
Volume de la chambre de séchage	m ³	171	56
Densité d'enfournement	kg/m ³	105	180
Température de séchage	°C	80	100
Temps de séchage	h	44	24
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	350	300
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	1600	15000
Température des effluents gazeux	°C	60	60

Tableau 2.9 : Paramètres de fonctionnement des séchoirs à fonctionnement périodique (séchoirs à chambres)

Le tableau ci-après présente les paramètres de fonctionnement de deux séchoirs tunnels et d'un séchoir à atmosphère contrôlée [4, UBA, 2001].

	Unité	Séchoir tunnel	Séchoir tunnel	Séchoir à atmosphère contrôlée
Produit		Argile réfractaire	Magnésite	à haute teneur en alumine
Production	t/h	2,1	4	3,5
Longueur du séchoir	m	80	51	36
Section	m ²	1,65	2,5	2,7
Densité d'enfournement	kg/m ³	1000	1800	1000
Température de séchage	°C	100	150 - 180	30 - 200
Temps de séchage	h	48	17	32 - 48
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	500	1500	n.a.
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	800	11000	5410
Température des effluents gazeux	°C	40	120	105

Tableau 2.10 : Paramètres de fonctionnement de deux séchoirs tunnels et d'un séchoir à atmosphère contrôlée

2.3.3.5 Cuisson

Les produits réfractaires cuisent à des températures comprises entre 1250 et 1850 °C. Les températures de maturation dépendent de la composition des matières premières et vont jusqu'au début de la déformation. Les températures de cuisson des principaux groupes de matières se situent dans les plages suivantes :

- briques d'argile réfractaire : de 1250 à 1500 °C
- briques de silice : de 1450 à 1500 °C
- briques à haute teneur en alumine : de 1500 à 1800 °C
- briques de magnésite : de 1400 à 1800 °C.

Ces produits cuisent dans des fours tunnels, des fours intermittents et des fours à cloche. Le tableau ci-après montre des exemples de paramètres de fonctionnement des fours tunnels utilisés dans l'industrie réfractaire [4, UBA, 2001].

Fours tunnels	Unité	Briques de magnésite	Briques d'argile réfractaire	Briques de bauxite	Briques de silice
Production	t/h	2 - 8	4	4	2,1
Longueur du four	m	150	113	116	180
Section	m ²	1,3 - 3	2,4	2,2	2,8
Densité d'enfournement	kg/m ³	1000 - 2500	600 - 1500	600 - 1300	700 - 1000
Température de cuisson	°C	1760 - 1850	1260	1400	1450
Besoin énergétique spécifique (séchage + cuisson)	kJ/kg	6000 - 9700	3200	4500	9050
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	15000-25000	10000 - 15000	10000 - 15000	1200
Température des effluents gazeux	°C	250 - 400	150 - 200	150 - 220	120

Tableau 2.11 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels utilisés dans l'industrie réfractaire

Le tableau ci-après montre des exemples de paramètres de fonctionnement des fours intermittents utilisés pour la cuisson des produits de silice, à haute teneur en alumine et d'argile réfractaire [4, UBA, 2001].

Fours intermittents	Unité	Briques de silice	Briques à haute teneur en alumine	Briques d'argile réfractaire
Production	t/cycle	153	40 - 50	18
Volume de la chambre de cuisson	m ³	180	20	25
Densité d'enfournement	kg/m ³	850 - 1100	2000 - 2500	650 - 1000
Section	m ²	1,3 - 3	2,4	2,2
Température de cuisson	°C	1540	1340 - 1650	1430
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	4500 - 7000	4500 - 8000	7600
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	jusqu'à 50000	jusqu'à 20000	3600 - 7000
Température des effluents gazeux	°C	180 -300	180 - 290	160 - 250

Tableau 2.12 : Paramètres de fonctionnement des fours intermittents

L'enfournement des briques, notamment dans des fours tunnels, se fait de plus en plus par des machines à enfournement automatique. Les briques issues des presses sont manipulées et placées automatiquement sur les wagonnets de four en fonction d'un modèle d'enfournement programmé. Ce modèle d'enfournement permet d'avoir à la fois une incidence des flammes et du gaz chaud de tous les côtés et un faible besoin énergétique. Les fours actuels fonctionnent au fioul et au gaz naturel. Dans certains cas, on utilise le chauffage électrique de façon standard pour une petite série de produits spéciaux.

2.3.3.6 Traitements ultérieurs

Dans certains cas spéciaux, les produits réfractaires, une fois cuits, doivent être traités par meulage, polissage et tournage dans des procédés par voie sèche ou par voie humide. A l'issue de ce traitement, ces produits sont palettisés ou conditionnés et recouverts de film plastique pour éviter toute pénétration d'eau, leur protection devant être garantie pendant toute la durée du transport.

2.3.3.7 Opérations spéciales

On procède à des opérations spéciales pour fabriquer des produits réfractaires dotés de caractéristiques spéciales. La formation de carbone liant et l'imprégnation de brai sont des opérations où on utilise des agents auxiliaires spéciaux. Les briques liées au carbone s'utilisent principalement dans la fabrication de l'acier. Les matières premières sont souvent traitées à chaud et pressées avec du goudron, du brai ou des résines servant de liant. L'adhérence des parties pressées est considérablement renforcée par le recuit et le traitement thermique final. L'agent liant se cokéfie au cours du recuit en l'absence d'air à une température comprise entre 320 et 550 °C. Lors du traitement thermique final, les produits sont chauffés à environ 150 à 220 °C dans des fours électriques. Dans certains cas, on imprègne les briques réfractaires avec du goudron ou du bitume pour éviter les « pores ouverts ».

2.3.3.8 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des produits réfractaires

Les principaux flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des produits réfractaires sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> binding agents, plastifier, (plaster), sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> agents liants, plastifiant, (plâtre), agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, chamotte, natural rocks, synth. raw materials	<u>Matières premières</u> argiles, chamotte, roches naturelles, matières premières synth.
Manufacture of refractory products	Fabrication des produits réfractaires
Refractory products	Produits réfractaires
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC), (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV), (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, (used plaster moulds), sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, (moules en plâtre usagés), boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.17 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des produits réfractaires

2.3.4 Granulats d'argile expansée

L'argile expansée est un produit céramique poreux, doté d'une structure poreuse uniforme constituée de fines cellules fermées et qui possède une enveloppe extérieure ferme et densément frittée. On la fabrique avec des matières premières contenant des minéraux argileux et des additifs. Ces matières premières sont préparées, moulées, puis soumises à des procédés de cuisson à des températures comprises entre 1100 et 1300 °C, ce qui engendre une augmentation de volume importante du fait de la dilatation.

Pour fabriquer de l'argile expansée à échelle industrielle, il faut respecter certains critères relatifs aux matières utilisées. Un autre facteur d'importance est le modèle du four, qui doit correspondre aux caractéristiques de la matière première et aux quantités à traiter. Les paramètres suivants sont susceptibles d'influer sur le processus de dilatation :

- la composition des matières premières
- les additifs
- la courbe de température
- l'atmosphère du four
- la viscosité, en fonction des facteurs d'influence susmentionnés.

Dans la fabrication de l'argile expansée, la pratique montre que la capacité de dilatation de l'argile est déterminée par les matières premières et les additifs, ainsi que par la technique employée pour le procédé thermique. Les principaux facteurs technologiques qui interviennent sur la capacité de dilatation des matières premières sont la vitesse d'échauffement et l'atmosphère du four.

La fabrication des granulats d'argile expansée comporte les étapes suivantes : extraction (activité non traitée dans le présent document), préparation des matières premières, façonnage, traitement thermique (séchage, cuisson), traitements ultérieurs du produit, récupération du produit et préparation pour le transport (ensachage, chargement). La figure suivante présente une vue schématique de la fabrication des granulats d'argile expansée [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]. L'étape de façonnage ne concerne pas la totalité des installations.

Raw materials as resources	Matières premières en tant que ressources
Slate clay	Argile schisteuse
Quarrying	Extraction
Raw material preparation	Préparation de la matière première
Shaping	Façonnage
Flue-gas cleaning	Epuration des effluents gazeux
Heat treatment drying/firing	Traitement thermique séchage/cuisson
Crushing/screening	Concassage/criblage
Bagging/loading	Ensachage/chargement

Figure 2.18 : Vue schématique de la fabrication des granulats d'argile expansée

2.3.4.1 Matières premières, additifs et agents auxiliaires

Les matières premières pour la fabrication des granulats d'argile expansée sont des argiles à frittage précoce. Avec une vitesse d'échauffement contrôlée et dans une plage de température comprise entre 1100 et 1300 °C, elles subissent une importante augmentation de volume. Seules les matières premières qui commencent par former une couche de fusion ou de frittage pyroplastique dense au moment d'être chauffées à ces températures peuvent convenir, et elles forment en même temps à l'intérieur du corps (fragment granulé) des gaz qui sont capables de dilater les pâtes plastiques. Pour cela, il faut la présence de fondants associés tels que des oxydes de fer, des alcalis, des oxydes alcalino-terreux, ainsi que des substances gazogènes qui se trouvent dans les matières premières ou qui peuvent être ajoutées lors du traitement.

Des études antérieures montrent que les caractéristiques de dilatation d'une argile servant de matière première ne peuvent généralement pas s'obtenir par analyse. Certaines conclusions générales peuvent être établies à propos de la composition chimique/minérale et d'autres caractéristiques des matériaux à capacité de dilatation éprouvée, à savoir :

- une plasticité relativement élevée, avec une haute teneur en fines
- une teneur relativement élevée en silicates stratifiés, notamment du groupe de l'illite ou du mica, et supérieure à 40 % est avantageuse ; la teneur en kaolinite est généralement faible
- la teneur en calcite ou en dolomite réduit le temps de dilatation ; la chaux en morceaux est nuisible, car elle peut provoquer par la suite un écaillage
- composition chimique :
 - Al_2O_3 : 12 - 25 %
 - SiO_2 : 47 - 78 %
 - fondants (Na_2O , K_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 , FeO) : 8 - 29 %
 - $\text{C}_{\text{organique}}$: 0 - 2,5 %
 - FeS_2 : doit être en grains fins (résidus dans le produit fini $\leq 1,0$ ou 1,5 % SO_3)
- composition minéralogique :
 - quartz : 7 - 45 %
 - carbonates : 0,1 - 17 %
 - minéraux argileux : 40 - 80 %
 - feldspath : 5 - 25 %
 - autre : 3 - 17 %
- un ramollissement pyroplastique de la masse ou des granulés doit se produire au cours de l'étape la plus propice de la formation gazeuse ; cela permet d'avoir la plage de dilatation la plus avantageuse, d'au moins 50 à 100 K.

On peut rendre dilatables des argiles naturellement inadéquates à la dilatation, en leur ajoutant des additifs ou agents auxiliaires appropriés qui facilitent la fabrication de produits expansés dotés de caractéristiques spéciales (par exemple, si l'objectif est de maximiser les caractéristiques d'isolation thermique, on ajoute souvent des auxiliaires de dilatation à l'argile expansée) et qui la rendent souvent plus sûre. Les exemples d'additifs (fondants ou agents de démoulage) et d'agents auxiliaires (auxiliaires de dilatation) présentés au tableau suivant se sont révélés particulièrement fiables :

Fondants	Auxiliaires de dilatation	Agents de démoulage
Oxydes de fer	Huiles lourdes	Composés de chaux
Hydroxydes de fer	Lignosulfonates	Dolomite
Argiles illitiques	Coke/charbon ultrafin	
	Argiles bitumineuses	

Tableau 2.13 : Exemples d'additifs et d'agents auxiliaires favorisant la dilatation

Les types d'additifs et d'agents auxiliaires dépendent de la composition de la matière première, de la technologie du procédé de fabrication (traitement des argiles humides ou sèches, voir section 2.3.4.2), de la viabilité économique et des caractéristiques de l'émission. Le dosage se situe généralement entre 0 et 10 % en poids.

2.3.4.2 Système global et technologie du procédé

2.3.4.2.1 Façonnage

Pour la préparation de la matière première et le façonnage, on emploie deux techniques élémentaires, en fonction de la teneur en eau de l'argile.

Pour les argiles ayant une teneur en humidité relativement élevée, la technique la plus répandue consiste à utiliser le procédé par voie humide : lors d'une transformation et d'une homogénéisation mécanique réalisée dans des réserves d'argile, broyeurs à meules, désintégrateurs, mélangeurs à deux hélices et pétrins, on introduit les argiles ductiles (avec additifs) dans un séchoir rotatif. En les faisant passer par une séquence appropriée d'accessoires de séchoir tels que chaînes, barres transversales et plaques, on améliore encore la fragmentation des morceaux d'argile.

Pour les argiles plutôt sèches, la technique la plus répandue consiste à utiliser le procédé par voie sèche : on utilise un concasseur primaire pour concasser de gros morceaux de matière première afin d'obtenir une dimension de grain inférieure à 100 mm. On peut homogénéiser cette matière au cours d'un stockage automatique et la récupérer au moyen d'un excavateur convoyeur à godet. Dans l'unité de broyage à sec, l'argile brute est concassée entre la piste de broyage rotative et les rouleaux broyeurs. On introduit l'argile pulvérulente dans le granulateur à plateau incliné, tout en ajoutant de l'eau. Le mouvement de rotation du plateau provoque la formation de granules sphériques qui sont évacués par le rebord inférieur du plateau, la rotation ayant un certain effet de granulation. On ajoute des réactifs appropriés pour réduire la tension de surface de l'eau ajoutée. On influe sur la taille des granules et on adapte leurs caractéristiques à la matière première utilisée, en modifiant la vitesse et l'inclinaison du plateau ainsi que la hauteur de son rebord. Les granules passent par un « tambour à poudre » où on applique de la poudre de calcaire à la surface des granules. Cette opération empêche que les granules non cuits ne s'agglomèrent et les protège ensuite dans le four de dilatation.

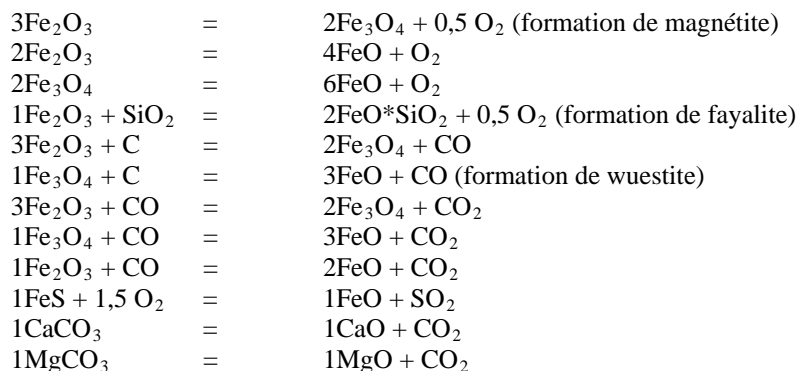
2.3.4.2.2 Technologie du procédé thermique

La tendance en matière de conception des fours est caractérisée par des efforts visant à mettre au point des systèmes capables de s'adapter, de façon simple et flexible, à la fois aux matières premières et aux caractéristiques requises pour les produits. Une des solutions pour obtenir ce résultat est la cuisson variable et le contrôle d'atmosphère, associés à différents temps de transfert pour chacune des phases thermiques. La courbe de température optimale permettant d'atteindre la densité souhaitée dépend du mélange de matières premières et des additifs. Pour optimiser l'opération, on place des préchauffeurs en amont du four de dilatation proprement dit. Le type de préchauffeur le plus répandu est le préchauffeur à tambour (séchoir). Pour le refroidissement, on utilise généralement des appareils du type refroidisseur vertical, refroidisseur rotatif, refroidisseur satellite et refroidisseur à grille ou à trémie.

Les fours rotatifs utilisés pour la fabrication de granulats d'argile expansée fonctionnent généralement en mode à contre-courant, autrement dit, la matière et l'agent chauffant se déplacent dans des sens opposés. La matière première est introduite par le côté froid du four. En raison de l'inclinaison du tambour et de la rotation du four, cette matière se déplace vers l'extrémité chaude du four, c'est-à-dire la zone à haute température. Le temps de transfert dépend de l'inclinaison du four, de sa vitesse et des accessoires qu'il contient. Le temps influe de façon considérable sur les caractéristiques du produit. Afin d'éviter que les granules ne collent entre eux, les fours sont parfois équipés d'accessoires adaptés, tels que des chaînes suspendues. Les dimensions du four varient en fonction de la technique utilisée. La longueur du tube varie entre 4 et 80 m, le diamètre entre 1,0 et 4,5 m. Les combustibles les plus courants sont le fioul, le charbon, le gaz, et les combustibles alternatifs ou secondaires peuvent être d'origine organique (par ex. les biocombustibles, la biomasse) ou d'origine non organique (par ex. les huiles usées, les solvants). La conception du système vise à optimiser le bilan thermique grâce à une plage étendue de choix de températures et de temps de chauffage.

2.3.4.2.3 Réaction chimique pendant la dilatation

Lors du chauffage des granulés, il se forme de la vapeur d'eau à partir de l'eau résiduelle, ainsi que de l'oxygène, de la vapeur d'eau provenant des procédés de constitution, des gaz de décomposition issus des substances organiques, du dioxyde de soufre et de l'acide carbonique issu du carbonate. En même temps, les pores de la surface commencent à se fermer. Le produit expansé (doté d'une structure cellulaire interne plus ou moins fine) se forme en raison du fait que les gaz se dilatent au fur et à mesure que la température augmente. Les principales réactions qui se produisent au cours de cette dilatation sont les suivantes :



Par conséquent, les principaux éléments et composés gazeux qui sont libérés sont l'oxygène, le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et/ou le dioxyde de soufre, la dilatation nécessitant la présence d'un ou plusieurs de ces éléments. Celle-ci se produit principalement dans une plage étendue de température, qui va d'environ 750 à 1300 °C.

2.3.4.2.4 Criblage et concassage ultérieurs

Dans la fabrication des granulats d'argile expansée, à l'issue du traitement thermique, on soumet les granulats à un procédé de criblage et de concassage pour obtenir la granulométrie et la qualité souhaitées. On emploie généralement des concasseurs à tamis sec et à sable.

2.3.4.3 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des granulats d'argile expansée

Les principaux flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des granulats d'argile expansée sont présentés sur la figure ci-après [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [28, Schorcht, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fossil fuel, bio and alternative energy	<u>Energie</u> électricité, combustible fossile, bioénergie et énergie de substitution
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> sorption agents, expansion aids	<u>Agents auxiliaires</u> agents de sorption, auxiliaires de dilatation
<u>Raw materials</u> clays, additives	<u>Matières premières</u> argiles, additifs
Manufacture of expanded clay aggregates	Fabrication des granulats d'argile expansée
Expanded clay aggregates	Granulats d'argile expansée
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.19 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des granulats d'argile expansée

2.3.5 Carreaux pour sols et murs

Le procédé de fabrication des carreaux pour sols et murs consiste en une série d'étapes successives qui se résume aux étapes suivantes :

- stockage des matières premières
- préparation de la pâte (poudre de pressage (procédé par voie sèche ou humide) ou pâte d'extrusion)
- façonnage
- séchage de la pâte crue
- préparation de l'émail et émaillage
- cuisson (avec ou sans émaillage)
- polissage
- triage et conditionnement.

Selon que le produit à fabriquer est émaillé ou non et selon qu'il y a simple, double ou triple cuisson, le carreau sera émaillé ou non au cours d'un procédé donné, ou l'ordre des étapes d'émaillage et de cuisson sera réarrangé en conséquence. La figure suivante présente une vue schématique des différentes possibilités pour les procédés de fabrication des carreaux pour sols et murs [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

Body raw materials	Matières premières de la pâte
Unglazed tiles	Carreaux non émaillés
Double fired glazed tiles	Carreaux émaillés bicuisson
Single fired glazed tiles	Carreaux émaillés monocuisson
Body preparation	Préparation de la pâte
Shaping	Façonnage
Drying	Séchage
Biscuit firing	Cuisson du biscuit
Glaze raw materials	Matières premières de l'émail
Glaze preparation and application	Préparation et application de l'émail
Firing	Cuisson
Glost firing	Recuisson
Polishing (optional)	Polissage (facultatif)
Sorting, packaging	Triage, emballage
Final product/shipping	Produit final/expédition

Figure 2.20 : Vue schématique de la fabrication des carreaux pour sols et murs

2.3.5.1 Matières premières

Les argiles et les kaolins sont les matières premières types utilisées dans la fabrication des carreaux pour sols et murs. La chamotte, le quartz, les feldspaths, le carbonate de calcium (calcite), la dolomite et le talc sont des matières premières non plastiques, qui jouent différents rôles dans la composition de la pâte (par exemple, les feldspaths servent de fondants tandis que la calcite permet la formation de phases cristallines). Ces mêmes matières, associées à des frites d'émail, des oxydes métalliques et des colorants, s'utilisent également comme émaux. On ajoute des électrolytes tels que le silicate ou le diphosphate de sodium pour réduire la consommation d'énergie lors du séchage par réduction d'eau.

Les composants de la pâte sont acheminés vers la zone de stockage des matières premières principalement sous forme de matières en vrac. Ces matières sont stockées à l'air libre, dans des entrepôts de stockage, des caissons ou des silos. Les masses plus petites sont acheminées et stockées dans des sacs et des conteneurs, et les matières liquides dans des cuves fermées.

2.3.5.2 Préparation des matières premières

La préparation des matières premières comporte différentes opérations et techniques, en fonction du type ou de la forme de la pâte à fabriquer.

Le dosage des matières premières se fait par voie gravimétrique, en tenant compte de leur teneur en eau. Pour colorer les composants de la pâte, on leur ajoute de petites quantités de pigments, d'oxydes métalliques ou de colorants. Les morceaux les plus gros sont préconcassés dans des broyeurs à cylindres ou des machines à forets. Après pesage, les matières préconcassées sont broyées (eau et électrolytes compris) dans des broyeurs Alsing qui peuvent être des broyeurs discontinus ou continus. Une autre variante est le procédé d'élutriation et d'homogénéisation des matières premières dosées, qui s'effectue dans de larges cuves. La suspension est pompée de ces cuves dans les broyeurs Alsing. La teneur en eau de la suspension est d'environ 35 %.

Après avoir été finement broyée (jusqu'à obtention d'une dimension de particule inférieure à 0,1 mm), la suspension est progressivement tamisée et stockée dans des cuves de stockage agitées. Elle est ensuite transformée soit en une pâte plastique (« pâte d'extrusion »), soit en une « poudre de pressage ». La fabrication et le traitement de barbotine de coulée sont rarement utilisés dans la fabrication des carreaux pour sols et murs.

Les « pâtes d'extrusion » se préparent généralement dans des broyeurs à meules ou des unités de feuilletage. Pour fabriquer une « pâte d'extrusion », on débarrasse la suspension de son eau dans des filtres-presses ou des filtres rotatifs, pour obtenir une teneur en eau comprise entre 20 et 25 %. On ajoute des substances organiques ou inorganiques au mélange plastique pour en maximiser la plasticité. Ces substances sont, par exemple, l'alginate, la dextrine, la lignine, la méthylcellulose, l'éthylcellulose et la paraffine.

Un procédé spécial pour préparer les matières premières au façonnage plastique consiste à les broyer finement dans des broyeurs à sec, à les mélanger et à leur ajouter ensuite environ 20 % d'eau (procédé de Buchtal) [23, TWG Ceramics, 2005].

Les carrelages sont le plus souvent fabriqués avec de la « poudre de pressage ». Cette poudre de pressage se fabrique par voie sèche ou par voie humide.

Dans le procédé par voie humide, la suspension est aspirée par des pompes dans des cuves de stockage agitées et envoyée dans des séchoirs à atomisation ou des séchoirs flash. Le séchage s'effectue à des températures comprises entre 350 et 450 °C, jusqu'à ce que la teneur en eau soit entre cinq et neuf pour cent. La chaleur requise dans le séchoir à atomisation est produite par la combustion de gaz naturel ou de fioul. On ajoute des agents rhéologiques pour maximiser la caractéristique glissante de la poudre. Les agents rhéologiques peuvent être organiques ou inorganiques ; les additifs les plus couramment utilisés pour préparer la composition de la pâte sont le silicate de sodium, le tripolyphosphate de sodium et les acrylates. L'utilisation d'agents liants comme la cellulose de carboxyméthyle, la méthylcellulose, l'alcool de polyvinyle etc. pour préparer la composition de la pâte est généralement inutile en raison de leur haute teneur en argiles, sauf dans des cas particuliers (notamment pour les grands formats) [23, TWG Ceramics, 2005].

Le procédé par voie sèche comprend le broyage à sec dans des broyeurs à cône, à marteaux et à cylindres, suivi d'un mouillage adapté de la poudre broyée, pour obtenir une teneur moyenne en eau d'environ 5 à 7 %.

2.3.5.3 Façonnage

On façonne la « pâte d'extrusion » dans une extrudeuse pour lui donner une forme géométrique correcte et on la découpe en morceaux. Les produits types fabriqués à partir de ces mélanges plastiques sont les carreaux à fendre. Les carreaux en grès et en faïence sont principalement fabriqués avec de la « poudre de pressage ». Cette poudre est façonnée en corps pressés dans des presses à impact à genouillère, des presses à vis ou des presses hydrauliques avec une pression d'environ 35 MPa. On emploie généralement des presses à plusieurs outils, qui sont capables de former quatre carreaux par cycle. Les produits crus pressés sont polis et placés dans le wagonnet de four tunnel ou le séchoir à rouleaux, automatiquement ou manuellement.

2.3.5.4 Séchage

Les corps pressés sont séchés principalement dans des séchoirs tunnels, des séchoirs à rouleaux ou des séchoirs verticaux. Pour chauffer le séchoir, on utilise la chaleur résiduelle du four ou des brûleurs à gaz naturel et à fioul. Le séchage s'effectue à des températures qui varient en fonction du type de technologie, par exemple entre 200 et 220 °C dans un four vertical et de 300 à 350 °C dans un four tunnel. Le séchage dure entre une et quatre heures, en fonction de la teneur en eau des produits crus. Pour éviter des fissures et des défauts d'émail à la cuisson, il faut que la teneur en eau résiduelle soit inférieure à un pour cent.

2.3.5.5 Cuisson et émaillage

Les carreaux sont fabriqués en tant que produits émaillés ou non émaillés à monocuisson ou en tant que produits émaillés à cuisson double, voire triple. Dans le procédé de bicuisson, les carreaux passent d'abord par une cuisson de biscuit. Cette dernière s'effectue à des températures comprises entre 1050 et 1150 °C, dans des fours tunnels classiques (en 20 à 50 heures) ou dans des fours à rouleaux modernes, en une ou deux heures. Les fours intermittents sont rarement utilisés pour la cuisson du biscuit. A l'issue de cette étape, les carreaux sont triés automatiquement et transportés jusqu'à l'émaillage. L'émail est appliqué sur les carreaux par pulvérisation ou arrosage. Les machines à émailler sont équipées d'applicateurs pour marbrer les carreaux. En outre, on peut utiliser des machines de sérigraphie à des fins décoratives et la décoration peut également se faire par des techniques de gravure ou de flexographie. Les matières premières des émaux sont souvent étirées sous forme de frites. Tous les composants d'une fritte sont déjà dosés, cuits et broyés. Les substances telles que le plomb étant liées sous forme moléculaire dans les frites, l'eau ne peut les éliminer au cours de cette étape.

La cuisson finale se déroule dans des fours à rouleaux, des fours tunnels ou des fours intermittents. Les carreaux émaillés sont placés sur des auxiliaires de cuisson et cuisent à des températures comprises entre 1050 et 1300 °C dans des fours tunnels ou des fours à rouleaux, sans auxiliaires de cuisson. Les carreaux de forme spéciale cuisent dans des fours intermittents ou des fours tunnels à des températures pouvant aller jusqu'à 1100 °C. Les tableaux suivants montrent des exemples de paramètres de fonctionnement des fours tunnels et des fours à rouleaux.

	Unité	Four tunnel Cuisson du biscuit	Four à rouleaux	
			cuisson finale	monocuisson
Produit		Carreaux à plus forte absorption d'eau		
Production	t/h	2,8	1,2	1,6
Longueur du four	m	120	60	80
Section	m ²	1,5 - 2,0	0,8 - 1,2	0,5 - 1,0
Densité d'enfournement	kg/m ³	500 - 700	10 - 30	10 - 30
Température de cuisson	°C	1100	1250	1300
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	3500	2900	2200
Débit vol. des effluents gazeux	m ³ /h	15000	10000	13000
Temp. des effluents gazeux	°C	180	160	200

	Unité	Four tunnel	Four à rouleaux	
			non émaillé	émaillé
Produit		Carreaux à moins forte absorption d'eau		
Production	t/h	1,2	2,1	2,1
Longueur du four	m	130	80	60
Section	m ²	1,5 - 2,0	1,2	0,8 - 1,0
Densité d'enfournement	kg/m ³	700 - 1000	20 - 30	20 - 30
Température de cuisson	°C	1200	1220	1230
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	3900	2900	2500
Débit vol. des effluents gazeux	m ³ /h	15000	10000	13000
Temp. des effluents gazeux	°C	220	160	160

Tableau 2.14: Paramètres de fonctionnement des fours tunnels et des fours à rouleaux

2.3.5.6 Traitement ultérieurs

A l'issue de la cuisson finale, certains types de carreaux (principalement les carreaux en grès de porcelaine non émaillés) peuvent être meulés ou polis. Enfin, les carreaux sont triés, emballés et palettisés manuellement ou automatiquement. Les palettes sont revêtues d'une feuille dans une machine d'emballage serré.

2.3.5.7 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des carreaux pour sols et murs

Les principaux flux d'entrée et de sortie du procédé de fabrication des carreaux pour sols et murs sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u>	<u>Energie</u>
electric power, fuel oil, natural gas, LPG	électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u>	<u>Agents auxiliaires</u>
plastifier, electrolytes, sorption agents, packaging material	plastifiant, électrolytes, agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Body raw materials</u>	<u>Matières premières de la pâte</u>
clays, kaolin, feldspar, quartz, chamotte	argiles, kaolin, feldspath, quartz, chamotte
<u>Glaze raw materials</u>	<u>Matières premières de l'émail</u>
Frits, kaolin, sand, pigments, opacifiers	Frittes, kaolin, sable, pigments, opacifiants
Manufacture of wall and floor tiles	Fabrication des carreaux pour sols et murs
Wall and floor tiles	Carreaux pour sols et murs
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u>	<u>Emissions dans l'air</u>
dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (heavy metals)	poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u>	<u>Déchets de production</u>
used filters, used sorption agents, sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	filtres usagés, agents de sorption usagés, boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.21 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des carreaux pour sols et murs

2.3.6 Céramiques ornementales (céramiques domestiques)

Le procédé de fabrication des céramiques domestiques est composé des étapes principales suivantes : stockage des matières premières, préparation des matières premières, façonnage, séchage, cuisson, émaillage, décoration et traitements ultérieurs. A titre d'exemple type de la fabrication des céramiques domestiques, la figure suivante présente les étapes de fabrication de la porcelaine de table [4, UBA, 2001].

Storage of kaolin	Stockage du kaolin
Storage of hard materials	Stockage des matières dures
Storage of glaze	Stockage de l'émail
Proportioning	Dosage
Mixing	Mélange
Milling	Broyage
Screening	Criblage
Dewatering (therm)	Déshydratation (therm.)
Dewatering (mech)	Déshydratation (méc.)
Proportioning, mixing	Dosage, mélange
Plastification	Plastification
Resolving	Séparation
Plastic shaping	Façonnage plastique
Drying	Séchage
Polishing	Polissage
Biscuit firing	Cuisson du biscuit
Glazing	Emaillage
Final firing	Cuisson finale
Grinding	Meulage
Decoration	Décoration
Decoration firing	Cuisson du décor
Sorting	Triage
Packaging	Conditionnement
Shipping	Expédition

Figure 2.22 : Vue schématique de la fabrication de la porcelaine de table

2.3.6.1 Matières premières

Les matières premières principales utilisées pour la fabrication des céramiques domestiques sont les argiles plastiques, le feldspath et le quartz. Les différents mélanges pour la pâte et pour l'émail sont livrés à l'usine et sont stockés dans des silos, des sacs et des conteneurs, en fonction de la teneur en eau de la matière première, de la méthode de stockage et de la granulométrie. Pour obtenir une bonne caractéristique de pâte, on utilise plusieurs matières premières avec différents paramètres.

Le tableau 2.15 et le tableau 2.16 montrent des gammes types de composition minéralogique et chimique des matières premières utilisées pour la fabrication des céramiques domestiques [3, CERAME-UNIE, 2003].

Minéral (%)	Faïence	Vitrifié	Porcelaine	Porcelaine phosphatique	Grès
Kaolin	25	25	55	25	0
Ball clay	15 - 25	25	0	0	0
Feldspath*	0 - 15	20	15	25	30
Talc	0 - 35	0	0	0	0
Silice	20 - 35	0	30	0	70
Silex	0	30	0	0	0
Cendre d'os*	0	0	0	50	0

* Syénite néphélinique : remplace en principe le feldspath et la cendre d'os

Tableau 2.15 : Gammes types de la composition minéralogique des matières premières pour la fabrication des céramiques domestiques

Minéral (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Autre
Kaolin	55	35	10
Ball clay	75	20	5
Feldspath	70	20	10
Syénite néphélinique	60	25	15
Talc	60	0	40 (MgO)
Silice	95	0	5
Silex	90	0	10
Cendre d'os	0	0	100 (Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH)

Tableau 2.16 : Gammes types de la composition chimique des matières premières pour la fabrication des céramiques domestiques

2.3.6.2 Préparation des matières premières

La préparation des matières premières servant à la fabrication des céramiques domestiques s'effectue selon un procédé par voie humide ou par voie sèche. Ce procédé produit essentiellement une « pâte d'extrusion » et une « poudre de pressage ». Les composants de la pâte sont dosés principalement par gravimétrie. Si des composés de kaolin sont dissous dans de l'eau, un dosage volumétrique est également réalisé. En général, les matières premières d'émaillage sont dosées par gravimétrie. On met les composés plastiques de la pâte en suspension dans de l'eau dans des cuves agitées pour préparer les mélanges pour le malaxage. On réalise ensuite un broyage par voie humide dans des broyeurs à tambour ou des broyeurs à agitateurs. Les composés durs de la pâte étant souvent livrés avec les bons paramètres granulométriques, un broyage supplémentaire est inutile. Les composés plastiques de la pâte et les composés durs de la pâte sont mélangés dans des agitateurs ou des mélangeurs. Ces composés subissent un criblage destiné à éliminer les impuretés, suivi d'une déferrisation qui élimine les composés ferreux étrangers. Cette déferrisation se déroule en champs électromagnétiques. La barbotine est déshydratée mécaniquement dans des filtres-presses ou thermiquement dans des séchoirs à atomisation. Pour fabriquer de la « pâte d'extrusion », on réduit la teneur en eau de la barbotine, de 65 % à 20 - 25 % dans des filtres-presses ou des filtres rotatifs. On homogénéise le gâteau de filtration et on le transforme en mottes dans des presses d'extrusion. Pour produire de la « poudre de pressage », on déshydrate la coulée de barbotine jusqu'à obtenir une teneur en eau de 5 à 8 %, dans des séchoirs à atomisation. On achemine la coulée de barbotine dans le séchoir à atomisation au moyen d'une pompe spéciale à coulée de barbotine. On réduit la teneur en eau par un courant de gaz chaud. Les effluents gazeux du séchoir chauffé au gaz et l'eau vaporisée sortent du séchoir par le haut.

On ajoute des agents rhéologiques et des agents liants à la « poudre de pressage » pour donner à celle-ci des caractéristiques de souplesse et de glissant. Pour ce faire, on utilise de la cellulose de carboxyméthyle, de la méthylcellulose, de l'éther cellulosique, de l'alcool de polyvinyle, de l'acétate de polyvinyle et du polysaccharide. On ajoute aussi de l'oléine, de l'huile minérale, de l'acide stéarique et de la cire. La part d'agents rhéologiques et d'agents liants dans la « poudre de pressage » se situe entre 0,2 et 0,4 % en poids. La « poudre de pressage » produite au cours du procédé par lit fluidisé peut être utilisée avec une part réduite d'agents rhéologiques et d'agents liants, ce qui lui confère de meilleures caractéristiques de déformation.

Les procédés de granulation en lit fluidisé, d'une part, et de granulation non thermique, d'autre part, sont des alternatives futures à la fabrication de la « poudre de pressage ». La consommation énergétique spécifique de la granulation en lit fluidisé est plus élevée que celle du procédé normal de séchage par atomisation, mais sa consommation thermique spécifique est inférieure.

Si on fabrique la « pâte d'extrusion » à des fins de façonnage plastique souple au moyen d'une « poudre de pressage », on mélange la poudre et la coulée de barbotine en retour jusqu'à ce que la teneur en eau soit d'environ 20 à 25 %. On stocke les sections cylindriques extrudées pendant une certaine durée pour garantir une humidité et une tension uniformes. On ajoute des additifs et agents organiques, ainsi que des agents liants inorganiques, par exemple du chlorure de magnésium, du sulfate de magnésium, du phosphate ou du borax, pour augmenter la résistance des composés plastiques, en vue d'un façonnage plastique mou.

On dissout le gâteau de filtration, les déchets des mélanges plastiques pour le façonnage plastique dur ou la « poudre de pressage » dans de l'eau pour obtenir des mélanges de coulage (barbotine de coulage). La teneur en eau de cette barbotine de coulage est entre 25 et 35 %. Pour lui conférer une bonne caractéristique de glissement même avec une teneur en eau plus faible, on utilise des additifs tels que la soude, le silicate de sodium ou de potassium, l'acide caustique ou humique.

2.3.6.3 Façonnage

Dans la fabrication des céramiques domestiques, les procédés de façonnage sont de trois types différents. La vaisselle plate, par exemple les assiettes et les plats, se fabrique principalement par pressage à sec. Les produits creux comme les vases sont fabriqués par coulage, tandis que les tasses et pichets sont fabriqués par façonnage plastique.

Dans le procédé de pressage à sec, on presse une « poudre de pressage » (dont la teneur en eau est d'environ 5 %) par voie isostatique au moyen d'agents auxiliaires. On remplit une presse de cette « poudre de pressage ». Cette presse comporte une partie supérieure et une partie inférieure. Dans la partie inférieure, la membrane isostatique constitue l'élément principal de la compression. Selon le produit, la partie supérieure est de forme diverse. Les presses horizontales munies de têtes multiformes sont capables de fabriquer divers produits à haut débit. Les presses à double tête produisent jusqu'à 1200 pièces à l'heure. On presse la poudre pour lui donner sa forme en lui appliquant une pression de 30 MPa. L'avantage de ce procédé réside dans la faible teneur en eau des produits crus.

Dans le procédé de façonnage plastique, on forme la « pâte d'extrusion » (dont la teneur en eau est de 20 à 25 %) dans des machines de calibrage, à l'aide d'outils de profilage. On fabrique les produits équilibrés dynamiquement dans des moules en plâtre qui sont produits dans des usines spéciales. On découpe la pâte plastique cylindrique en tranches identiques. A l'étape suivante, on répartit mécaniquement les tranches dans les moules en plâtre de la machine de calibrage. Ces derniers ont une durée de vie très courte. Le plus souvent, ils ne servent que pour 100 à 150 pièces. Depuis quelques années, on emploie des moules poreux en matières polymères qui ont une plus longue durée de vie.

Les articles non équilibrés dynamiquement sont fabriqués par coulage en barbotine. Pour former le corps, on déshydrate la barbotine coulée dans des moules en plâtre. Le procédé de coulage en barbotine s'emploie principalement pour la fabrication de vaisselle plate. Les vases et les pichets sont fabriqués par un procédé de coulage par drainage. Pour de la fabrication à l'échelle industrielle, on utilise des machines de coulage. Les fabrications à petite échelle sont réalisées par coulage manuel. Le temps de formation du corps peut être réduit sous pression. Le coulage sous pression s'effectue dans des moules en polymère poreux, sous des pressions pouvant atteindre 4 MPa. Le coulage sous pression étant beaucoup plus rapide que le coulage classique, les cycles de coulage ne durent que deux ou trois minutes.

Le pressage plastique est un autre procédé qui s'emploie pour la fabrication des céramiques domestiques. Les articles sont fabriqués dans des moules en plâtre en deux parties ou dans des moules en polymère. Par rapport au procédé de coulage en barbotine utilisant un corps plastique, ce procédé réduit le temps de formation du corps.

2.3.6.4 Séchage

Les articles fabriqués par les procédés de coulage en barbotine ou de façonnage plastique doivent être séchés dans des séchoirs spéciaux jusqu'à ce que leur teneur en eau soit inférieure à deux pour cent. Pour cette déshydratation, on utilise des séchoirs à chambres et des séchoirs tunnels chauffés par la chaleur résiduelle du four, par du gaz naturel ou par du fioul EL. Les séchoirs par infrarouge et les séchoirs à micro-ondes représentent une alternative au procédé de séchage classique. On emploie ces séchoirs pour présécher les mélanges de coulage, ainsi que pour sécher les moules en plâtre usagés et neufs. Les séchoirs à micro-onde se présentent comme des séchoirs à chambres, à tunnels et à passage entre chambres.

Les rugosités de surface et les marques de moule laissées par le façonnage s'éliminent par rectification. La rectification s'effectue avec des couteaux puis par un traitement réalisé avec un tampon en éponge humide. Les articles pressés et calibrés sont nettoyés principalement par des machines, les autres étant traités manuellement. Pour une fabrication à l'échelle industrielle, les procédés de façonnage, de séchage et de rectification sont regroupés en une seule étape de fabrication.

2.3.6.5 Cuisson, émaillage et décoration

Les céramiques domestiques cuisent entre une et quatre fois, selon la matière et la technique de fabrication. Lors de la première étape, la cuisson de biscuit donne au semi-produit la résistance et l'absorbance nécessaires pour l'émaillage. Les températures de cuisson du biscuit sont comprises entre 900 et 1050 °C, le temps de cuisson dans un four tunnel classique se situant entre 18 et 30 heures. Les fours à cuisson rapide permettent de réaliser des temps de cuisson compris entre trois et sept heures.

L'émaillage suit la cuisson du biscuit. L'émail est constitué de composés vitreux avec une part plus élevée de fondants dispersés dans l'eau. Les articles creux (à l'exception des tasses) sont émaillés par trempage manuel. La vaisselle plate et les tasses sont émaillées mécaniquement au cours d'un procédé d'émaillage par déversement, tandis que les articles fabriqués à petite échelle sont émaillés manuellement, par trempage. La vaisselle plate est également émaillée par pulvérisation. On utilise des agents adhésifs (par exemple la polyamine ou la dextrine) comme agents liants organiques et comme colles. On mélange des électrolytes à l'émail pour accélérer le séchage.

La recuisson qui suit s'effectue sous atmosphère oxydante ou réductrice, à des températures comprises entre 1320 et 1430 °C. Les fours de recuisson sont des fours tunnels à wagonnets, des fours à rouleaux (à plusieurs étages), des fours à cuisson rapide équipés de tables de cuisson mobiles, des fours à dalles ou des fours à bande convoyeuse. Les fours périodiques comme les fours à chambre, les fours intermittents et les fours à cloche fonctionnent à des vitesses d'alimentation inférieures. Les articles à cuire sont placés sur des auxiliaires de cuisson ignifuges (appelés « matériel d'enfournement »). La durée de la recuisson varie entre 25 et 36 heures dans un four tunnel et entre trois heures et demie et cinq heures dans un four à cuisson rapide sans auxiliaires de cuisson.

Le tableau 2.17 et le tableau 2.18 présentent des exemples de paramètres de fonctionnement des fours intermittents et des fours à fonctionnement continu [4, UBA, 2001].

Four intermittent	Unité	Porcelaine
Production	t/cycle	0,91
Volume de la chambre de cuisson	m ³	7,0
Densité d'enfournement	kg/m ³	12,8
Température de cuisson	°C	1400
Temps de séchage	h	44
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	20000
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	12500
Température des effluents gazeux	°C	800

Tableau 2.17 : Paramètres de fonctionnement d'un four intermittent

Fours tunnels	Unité	Porcelaine		Porcelaine	Porcelaine
Cuisson		Cuisson du biscuit	Cuisson d'émail	Cuisson rapide de l'émail	Cuisson rapide de l'émail
Production	t/h	0,3 - 0,7	0,2 - 0,4	0,58	0,47
Longueur du four	m	60 - 100	80	70	56
Section	m ²	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,7	0,94
Densité d'enfournement	kg/m ³	60 - 70	60 - 70	< 100	< 100
Température de cuisson	°C	850 - 1260	1200 - 1400	1420	1420
Besoin énergétique spécifique (séchage + cuisson)	kJ/kg	25000	20000	12500 sans séchage	19700
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	3500-5000	3500-5000	n.a.	n.a.
Température des effluents gazeux	°C	120 - 170	120 - 170	n.a.	n.a.

Tableau 2.18 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels

L'émail fond pendant la cuisson et scelle le corps céramique poreux. La surface devient étanche à l'eau et lisse. A l'issue de la cuisson d'émail, les articles sont répartis selon les qualités correspondantes. Les zones sans émail sont meulées et polies pour maximiser la valeur des produits.

La porcelaine phosphatique est plus spécialement destinée à la vaisselle de table et aux services à thé traditionnels. Les matières premières principales de la porcelaine phosphatique sont l'argile de Cornouailles, la pierre de Cornouailles et jusqu'à 50 % d'os de bovins calcinés. Les températures de cuisson d'émail sont comprises entre 1250 et 1350 °C, et les températures de cuisson du biscuit entre 1100 et 1150 °C. Une atmosphère de four contenant de la vapeur d'émail assure une surface extrêmement lisse.

Le procédé de décoration réalisé ensuite maximise la valeur du produit et permet de le personnaliser. Pour le décor, on utilise des couleurs sur émail, des couleurs de grand feu, des couleurs sous émail et des composés métalliques. Dans la décoration sur émail, on décore des articles émaillés et déjà cuits. Le décor sur émail se fond dans l'émail grâce à une cuisson supplémentaire. Dans la décoration de grand feu, les pigments colorés pénètrent dans l'émail. Dans la décoration sous émail, on décore les articles avant de commencer l'émaillage. Les procédés de décoration types sont la décalcomanie, la réimpression, la sérigraphie directe, l'impression offset, l'application de bandes de couleur, l'estampage, le poudrage, la peinture, la pulvérisation, le pochoir et la gravure. Outre la décoration manuelle, on emploie des machines pour la sérigraphie et l'impression en couleur. De nombreux oxydes sont employés comme fondants, opacifiants et pour une coloration directe dans les procédés d'émaillage et de décoration. Les couleurs des émaux et des décors sont des systèmes complexes composés de nombreux pigments. La liste ci-après mentionne les éléments et la valence chimique (entre parenthèses) dans laquelle ils apparaissent en tant que composés oxydiques dans les pigments : Cu (1, 2), Ca (2), Zn (2), Al (3), In (3), Si (4), Sn (4), Pb (2), Ti (3,4), Zr (4), Ce (4), Pr (4), V (4, 5), Sb (3, 4, 5), Cr (3, 6), Mo (4, 6), Mn (2, 4), Fe (2, 3), Co (2), Ni (2) et Cd (2).

Outre le procédé de décoration, des exemples de paramètres de fonctionnement de différents fours sont présentés au tableau 2.19 et au tableau 2.20 [4, UBA, 2001], [21, Almeida, 2004].

Type de four	Procédé	Température de cuisson (°C)	Temps de cuisson
Four à fusion électrique avec panier de transport	Décoration par fusion	760 - 840	2 - 4 h
Four tunnel à cuisson rapide (traîneau ou table de cuisson)	Décoration sur émail	850 - 950	40 - 70 min
Four à rouleaux avec auxiliaires de cuisson	Décoration sur émail	850 - 950	40 - 70 min
Four à rouleaux avec objets en quartz	Décoration sur émail	1080	40 - 70 min
Four à bande convoyeuse double piste	Décoration sur émail	850 - 950	40 - 70 min
Four à bande convoyeuse double piste (bande spéciale)	Décoration sur émail	1050	40 - 70 min
Four tunnel avec transport par plateau	Décoration par calcination	1300 - 1400	7 - 16 h
Four intermittent	Décoration sur émail	850 - 950	8 - 10 h

Tableau 2.19 : Paramètres de fonctionnement pour la décoration sur émail

Type de four	Procédé	Température de cuisson (°C)	Temps de cuisson
Four intermittent	Décoration par calcination	1300 - 1400	14 - 24 h
Four tunnel à cuisson rapide (traîneau ou table de cuisson)	Décoration par calcination	1350 - 1420	2 - 4 h
Four tunnel à cuisson rapide (traîneau ou table de cuisson)	Décoration dans l'émail	1200 - 1280	60 - 90 min
Four à rouleaux avec rouleaux spéciaux	Décoration dans l'émail	1200	60 - 90 min
Four intermittent	Décoration sous émail	1370 - 1420	18 - 30 h
Four tunnel avec wagonnet	Décoration sous émail	1370 - 1420	18 - 30 h
Four tunnel avec table de cuisson	Décoration sous émail	1370 - 1420	12 - 16 h
Four tunnel à cuisson rapide (traîneau ou table de cuisson)	Décoration sous émail	1370 - 1420	3 - 4 h
Four à rouleaux avec rouleaux spéciaux	Décoration sous émail	1350	2 - 4 h

Tableau 2.20 : Paramètres de fonctionnement pour la décoration dans et sous émail

Un autre procédé de fabrication de céramiques domestiques qui s'emploie dans certains cas comporte une seule cuisson, sans précuisson. Ce procédé à cuisson unique est suffisant pour les produits non décorés et pour les produits dont les décors sont appliqués avant l'émaillage. La cuisson dure 20 heures dans un four intermittent, à une température de 1260 °C. L'or, le platine et autres couleurs métalliques doivent cuire à une température inférieure, de 890 °C [17, Burkart, 2004], [22, SYKE, 2004].

Dans la fabrication des céramiques domestiques, les combustibles principalement utilisés dans les différents types de fours sont le gaz naturel et le gaz de pétrole liquéfié. Les combustibles tels que le fioul EL sont rarement utilisés dans ce secteur.

2.3.6.6 Traitements ultérieurs

A l'issue de la décoration et du contrôle de qualité, les produits sont triés. Un traitement consécutif par voie humide est réalisé par des meuleuses et des polisseuses pour lisser la surface des produits. Certains produits sont préemballés mécaniquement. Les lots destinés à la vente et à l'expédition sont ensuite regroupés et emballés manuellement. Pour la fabrication de la vaisselle de table moderne, les semi-produits sont manipulés automatiquement par des robots entre les étapes de façonnage, de séchage, de cuisson et de traitements ultérieurs.

2.3.6.7 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques domestiques

Les principaux flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques domestiques sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> plastifier, plaster, sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> plastifiant, plâtre, agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, kaolin, feldspar, quartz, pegmatite	<u>Matières premières</u> argiles, kaolin, feldspath, quartz, pegmatite
Manufacture of household ceramics	Fabrication des céramiques domestiques
Household ceramics	Céramiques domestiques
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, used plaster moulds, sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, moules en plâtre usagés, boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.23 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques domestiques

2.3.7 Appareils sanitaires

Les étapes principales de fabrication des sanitaires sont le stockage des matières premières, la préparation des matières premières, le façonnage, le séchage et l'émaillage, la cuisson et les traitements ultérieurs. La figure suivante présente une vue schématique du procédé de fabrication des sanitaires [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Storage of kaolin	Stockage du kaolin
Storage of clay	Stockage de l'argile
Storage of hard material	Stockage des matières dures
Storage of glaze raw materials	Stockage des matières premières de l'émail
Precrushing	Préconcassage
Elutriation	Elutriation
Homogenisation	Homogénéisation
Proportioning	Dosage
Body preparation	Préparation de la pâte
Fine grinding	Broyage fin
Screening and deferrisation	Criblage et déferrisation
Storage	Stockage
Mould making	Fabrication des moules
Slip casting	Coulage en barbotine
Garnishing and dressing	Garnissage et dressage
Drying	Séchage
Fettling/sponging	Ebavurage/finissage à l'éponge
Glazing	Emaillage
Firing	Cuisson
Refiring	Recuisson
Grinding	Meulage
Packaging	Conditionnement
Shipping	Expédition

Figure 2.24 : Vue schématique de la fabrication des appareils sanitaires

2.3.7.1 Matières premières

Les matières premières pouvant convenir sont le kaolin, l'argile, le quartz, le feldspath et le carbonate de calcium. Un mélange type est constitué de 40 à 50 % de kaolin et d'argile, de 20 à 30 % de quartz, de 20 à 30 % de feldspath et entre 0 et 3 % de carbonate de calcium. Le kaolin est stocké de préférence sous forme de mottes avec une teneur en eau maximale de 15 pour cent. Les matières dures telles que le quartz et le feldspath sont broyées en fines particules et utilisées avec une teneur en eau inférieure à un pour cent. Les matières premières sont stockées dans des silos ou des caissons pour éviter toute influence atmosphérique.

2.3.7.2 Préparation des matières premières

La préparation des matières premières pour les appareils sanitaires s'effectue principalement par un procédé de préparation par voie humide. Le kaolin et l'argile sont affinés dans des concasseurs à rouleaux dentés ou des appareils similaires. A l'issue de cette étape, les matières sont réduites à un diamètre de particule de moins de cinq millimètres par broyage fin. Elles sont élutriées dans de l'eau et les impuretés sont éliminées de la suspension par criblage. Ensuite, la suspension argileuse tamisée est homogénéisée dans des cuves avec des agitateurs lents. Le dosage des matières dures s'effectue par gravimétrie et des électrolytes sont ajoutés.

Cette préparation des matières premières est rarement effectuée par le fabricant de céramiques. Souvent, le fabricant ne fait que doser les matières premières qui lui ont été livrées, la fabrication de l'émail à proprement parler se faisant ensuite dans des délayeurs [23, TWG Ceramics, 2005].

Un stockage consécutif de quelques jours dans des cuves agitées permet d'augmenter les caractéristiques de façonnage de la barbotine de coulage. On emploie des agents de liquéfaction et de stabilité tels que des mélanges de soude, de verre soluble, de caustique, de potasse et d'acide humique, pour obtenir une aptitude au coulage en même temps qu'une faible teneur en eau. On dose les composants de l'émail puis on les mélange et on les broie dans des broyeurs à boulets (discontinus) ou dans des broyeurs horizontaux ou annulaires (continus). On ajoute à l'émail des agents liants tels que la cellulose de carboxyméthyle ou la polyamine pour renforcer son adhérence et sa force de prise après broyage. La déferrisation de la pâte et de l'émail est réalisée au moyen d'aimants permanents pour éviter une coloration des produits due à des impuretés magnétiques.

2.3.7.3 Façonnage

Aujourd'hui, la plupart des produits en céramique sont encore façonnés dans des moules en plâtre. En matière de développement, la tendance s'oriente vers un façonnage sans plâtre, effectué dans des moules en polymère poreux. Le coulage se fait normalement dans des moules en plâtre. L'eau s'évacue de la barbotine de coulage à travers les zones poreuses des moules en plâtre pour former le corps. Le temps de formation du corps est réduit par la pression. Les appareils sanitaires complexes sont fabriqués par un procédé de coulage par drainage. On fabrique des pièces de coulage solides supplémentaires par un procédé parallèle et on les rajoute en les fixant au corps principal. Au cours de cette étape de garnissage, on crée la forme définitive du produit. Après avoir séparé le corps du moule, on ébavure les marques du moule et on les traite. La manipulation et le dressage du corps se font le plus souvent automatiquement.

Les corps des appareils sanitaires en céramique sont formés de plus en plus souvent par des machines équipées de moules polymères à plusieurs pièces associées à un coulage sous pression. En fonction de l'article, on utilise des moules en polymère à quatre ou cinq pièces. Une pression pouvant atteindre 3 MPa minimise le temps de formation du corps. Le cycle de façonnage d'une cuvette de WC est réduit à cinq à huit minutes. L'ébavurage et le garnissage se font généralement pendant que le corps est fixé dans le moule. Par rapport au moule en plâtre, le moule en polymère a l'avantage d'être plus facile à nettoyer et d'avoir une durée de vie plus longue.

2.3.7.4 Séchage et émaillage

Les produits crus sèchent en deux étapes. A l'issue du séchage jusqu'à consistance cuir, l'article cru est traité pour ne présenter aucun défaut. Le séchage blanc qui suit minimise la teneur en eau jusqu'à moins de un pour cent. Le séchage se déroule dans des séchoirs tunnels ou à chambres. Des séchoirs à micro-ondes, construits sur le modèle des séchoirs tunnels, sont également employés pour le séchage à consistance cuir et le séchage blanc. Les tableaux suivants montrent des exemples de paramètres de fonctionnement pour des fours intermittents [4, UBA, 2001], [21, Almeida, 2004].

Séchoirs à chambres	Unité	Cuvettes de WC et lavabos
Production	t/cycle	4 - 45
Volume de la chambre de séchage	m ³	30 - 375
Densité d'enfournement	kg/m ³	30 - 200
Température de séchage	°C	60 - 90
Temps de séchage	h	8 - 20
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	300 - 1400
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	2000 - 20000
Température des effluents gazeux	°C	60 - 150

Tableau 2.21 : Paramètres de fonctionnement des séchoirs à fonctionnement périodique (séchoirs à chambres)

A l'issue du séchage blanc, on contrôle les produits crus et on débarrasse leur surface des poussières et des impuretés. On applique l'émail à la surface des produits par pulvérisation, opération réalisée par des robots ou manuellement. L'épaisseur de l'émail se situe entre 0,3 et 0,5 mm, selon la couleur de la pâte et la part d'opacifiants dans l'émail. Une pulvérisation effectuée en champ électrique permet de maximiser la qualité de l'émail.

2.3.7.5 Cuisson

Les appareils sanitaires cuisent dans des fours tunnels et des fours à rouleaux, à des températures comprises entre 1250 et 1290 °C et sous atmosphère oxydante. La fabrication à petite échelle se fait dans des fours intermittents flexibles tels que des fours intermittents. Les fours intermittents fonctionnent de manière à modifier la courbe de cuisson spécifique aux produits dans des cycles très courts. Des plages de paramètres de fonctionnement des fours de fabrication des appareils sanitaires sont présentées au tableau 2.22 et au tableau 2.23 [23, TWG Ceramics, 2005], [21, Almeida, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Four tunnel	Unité	Appareils sanitaires
Production	t/h	1,5 - 2,0
Longueur du four	m	570 - 110
Section	m ²	1,5 - 2,5
Densité d'enfournement	kg/m ³	100 - 150
Température de cuisson	°C	1250 - 1290
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	8300
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	12000
Température des effluents gazeux	°C	150 - 550

Tableau 2.22 : Paramètres de fonctionnement des fours tunnels

Four intermittent	Unité	Appareils sanitaires
Production	t/cycle	5 - 15
Volume de la chambre de cuisson	m ³	50 - 150
Densité d'enfournement	kg/m ³	100
Température de cuisson	°C	1210 - 1250
Besoin énergétique spécifique	kJ/kg	8300 - 11300
Débit volumétrique des effluents gazeux	m ³ /h	jusqu'à 50000
Température des effluents gazeux	°C	150 - 550

Tableau 2.23 : paramètres de fonctionnement des fours intermittents

Dans la fabrication des appareils sanitaires, les combustibles principalement utilisés dans les différents types de fours sont le gaz naturel et le gaz de pétrole liquéfié. Les combustibles tels que le fioul EL et le fioul lourd sont rarement utilisés dans ce secteur. Des déchets de casse et des déchets réfractaires sont produits au cours de la cuisson. Les déchets de casse sont des articles qui sont défectueux à l'issue de la cuisson. Les déchets réfractaires proviennent de parties cassées du four ou d'auxiliaires de cuisson cassés ou de pièces de wagonnets de tunnel.

2.3.7.6 Traitements ultérieurs

A l'issue du triage final, les surfaces de montage sont abrasées par meulage à l'eau et par polissage. Dans certains cas, des raccords sont rajoutés aux cuvettes de WC et aux réservoirs avant leur conditionnement final.

2.3.7.7 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des appareils sanitaires

Les principaux flux d'entrée et de sortie du procédé de fabrication des sanitaires sont présentés sur la figure ci-après [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> plastifier, plaster, electrolytes, sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> plastifiant, plâtre, électrolytes, agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, kaolin, feldspar, quartz, calcium carbonate	<u>Matières premières</u> argiles, kaolin, feldspath, quartz, carbonate de calcium
Manufacture of sanitaryware	Fabrication des appareils sanitaires
Sanitaryware	Appareils sanitaires
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, used plaster moulds, sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, moules en plâtre usagés, boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.25 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des appareils sanitaires

2.3.8 Céramiques techniques

Les céramiques techniques sont faites non seulement avec des argiles, mais également avec des matières premières synthétiques. Comme pour les autres secteurs céramiques, les matières premières cuisent dans des fours qui fonctionnent principalement au gaz naturel, mais également à l'énergie électrique pour la cuisson.

En raison de la grande diversité des céramiques techniques et des variantes qu'elle implique dans les procédés de fabrication, il est difficile de définir une vue schématique d'ensemble du procédé de fabrication, mais on peut montrer des exemples de vues schématiques de ces différents procédés.

La figure suivante présente la vue schématique d'un procédé de fabrication d'isolants électriques [1, BMLFUW, 2003].

Raw materials	Matières premières
Balance	Equilibrage
Ball mills	Broyeurs à boulets
Storage tanks	Cuves de stockage
Agitating mixer	Mélangeur agitateur
Chamber filter press	Filtre-presse à chambre
Spray dryer	Séchoir à atomisation
Isostatic press	Presse isostatique
Double shaft mixer and extrusion press	Mélangeur à deux hélices et presse d'extrusion
Turning lathe	Tour
Room drying	Séchage en chambre
Dryer	Séchoir
Spray and dip glazing	Emaillage par pulvérisation et trempage
Shuttle kilns	Fours intermittents
Cutting, polishing, grinding	Découpe, polissage, meulage
Electrical check	Vérification électrique
Assembly	Assemblage
Mechanical check	Vérification mécanique
Storage	Stockage

Figure 2.26 : Vue schématique d'un procédé de fabrication d'isolants électriques

La figure suivante présente la vue schématique d'un procédé de fabrication de catalyseurs céramiques [1, BMLFUW, 2003].

Raw materials	Matières premières
Balance	Bilan
Knead mixer	Mélangeur pétrisseur
Pre-extruder	Pré-extrudeuse
Extruder	Extrudeuse
Chamber dryers	Séchoirs à chambre
Bandsaw	Scie à ruban
Tunnel kilns	Fours tunnels

Figure 2.27 : Vue schématique d'un procédé de fabrication de catalyseurs céramiques

2.3.8.1 Matières premières

Les céramiques techniques, qui ne comportent qu'une faible quantité d'argile, voire pas du tout, reposent toutes sur les matières suivantes : oxydes, carbures, nitrures et borures de Al, Mg, Mn, Ni, Si, Ti, W, Zr et autre ions métalliques. Comme exemples types, on peut citer Al_2O_3 (l'alumine), MgO (la périclase ou magnésie calcinée à mort), SiC (le carbure de silicium), TiN (le nitrure de titane) et WB_2 (le borure de tungstène) [8, Ullmann's, 2001].

Néanmoins, les argiles plastiques (par exemple le kaolin), le feldspath et le quartz peuvent également servir de matière première pour les céramiques techniques, notamment pour la fabrication des isolants électriques [1, BMLFUW, 2003].

On utilise en outre des additifs (agents auxiliaires) tels que les auxiliaires de frittage (inorganiques) et les auxiliaires de formage (généralement organiques), qui sont aussi importants que les matières premières elles-mêmes [24, VKI-Germany, 2004].

2.3.8.2 Préparation des matières premières

Pour la fabrication des matières premières, il existe deux possibilités :

- a) le fabricant de céramiques techniques se procure les matières premières nécessaires et procède à toutes les étapes de traitement consécutives. Les différents procédés de façonnage nécessitent des préparations spécifiques des matières non cuites :
 - granulats - pour le pressage
 - matière plastique - pour l'extrusion
 - barbotines - pour le coulage.
- b) le fabricant de céramiques techniques se procure des matières toutes prêtes et non cuites, et commence par l'étape de dosage ou de façonnage des procédés céramiques [24, VKI-Germany, 2004].

Pour les céramiques techniques, il faut souvent transformer chimiquement les matières premières en composés intermédiaires. Ces composés se prêtent à la purification et à la transformation chimique ultérieure en une forme finale. Pour certaines céramiques techniques, il faut synthétiser des poudres spécialisées, la synthèse de ces poudres pouvant s'opérer selon divers processus chimiques. Des processus chimiques tels que le traitement sol-gel peuvent également contourner le stade pulvérulent.

Les critères de haute résistance et de lissé de surface, notamment pour les petites pièces, nécessitent des poudres fines. Ainsi, un des axes de recherche en céramique technique vise à produire des poudres très fines, à particules monodimensionnelles et essentiellement sphériques. Celles-ci s'obtiennent principalement par chimie colloïdale des oxydes. Les nitrures et carbures susmentionnés nécessitent une nucléation et une croissance contrôlées des réactions en phase gazeuse. Toutefois, la plupart des céramiques de haute technologie sont encore fabriquées à partir de poudres avec une large distribution de tailles de l'ordre de moins d'un micromètre [8, Ullmann's, 2001].

Certaines matières premières sont calcinées (cuites « à mort » à haute température) pour pouvoir servir à la fabrication des céramiques techniques. Pour en savoir plus sur ce sujet, voir la section 2.2.2.8.

Le procédé de séchage par atomisation s'emploie également dans la fabrication des céramiques techniques. La suspension aqueuse de matière première qui résulte du broyage humide par boulets (teneur en matière sèche ~ 60 à 70 %) est pulvérisée sous pression pour produire de fines gouttelettes qui entrent en contact avec un courant d'air chaud. Le séchage de ces gouttelettes produit des granulés creux, extrêmement uniformes et plus ou moins sphériques (d'une teneur en eau qui va généralement de 5,5 à 7 %). Cette forme de « poudre de pressage » possède une forte aptitude à l'écoulement, ce qui permet un remplissage précis des moules de pressage suivi du pressage de produits de céramique technique [3, CERAME-UNIE, 2003].

On notera que les matières notamment synthétiques telles que le carbure de silicium, les matières premières calcinées ainsi que la « poudre de pressage » séchée par atomisation sont souvent fabriquées par des fabricants spécialisés mais peuvent devoir néanmoins subir un procédé de fragmentation.

Cela dit, on fabrique non seulement de la « poudre de pressage », mais également de la « pâte d'extrusion », notamment si on utilise des argiles plastiques comme matières premières pour les céramiques techniques (par exemple pour la fabrication de porcelaine électrique ou de catalyseurs céramiques) [1, BMLFUW, 2003]. Pour fabriquer de la « pâte d'extrusion », on déshydrate la suspension broyée dans des filtres-presses jusqu'à obtenir une teneur en eau d'environ 20 à 25 %.

Une autre possibilité pour la préparation des matières premières consiste à fabriquer de la barbotine de coulage dans un procédé de préparation par voie humide. Souvent, le fabricant ne fait que doser les matières premières qui lui ont été livrées, la fabrication de l'émail se faisant ensuite dans des délayeurs [23, TWG Ceramics, 2005].

2.3.8.3 Façonnage

Les méthodes de façonnage des pièces en céramique technique se classent parmi les types de base suivants :

- pressage (de 0 à 15 % d'humidité ; pressage à sec, isostatique, humide)
- façonnage plastique (de 15 à 25 % d'humidité ; extrusion)
- coulage (> 25 % d'humidité ; moulage par injection, coulage en barbotine, coulage en bande).

Pressage à sec

Le pressage à sec s'emploie pour fabriquer des produits de précision de série. Des granulats non grumeleux sont comprimés dans des filières en acier conçues spécialement pour la pièce à fabriquer. Le coût élevé de ces filières (parfois en carbure) ne se justifie généralement que pour de la fabrication en grande série.

Le pressage à sec est le procédé le plus économique pour la fabrication en grande série, et convient à des formes géométriques simples ou complexes. En principe, les creux et les trous ne sont conçus que dans le sens du pressage. Selon le modèle de la machine de pressage à sec, on peut fabriquer des composants dont la taille va de celle d'un carreau à celle d'une tête d'allumette. Des disques ou plaques de petit format peuvent être pressés à une épaisseur d'environ 0,8 à 1,0 mm. Il est toujours possible de fabriquer de fines crêtes ou structures similaires sur le composant, à condition que le granulé pressé puisse remplir efficacement les creux ménagés dans l'outil de pressage, et à condition que l'outil nécessaire puisse être créé.

Pressage isostatique

Le pressage isostatique convient à la fabrication d'ébauches uniformément comprimées et de grosses pièces adaptées pour être usinées à l'état cru. Les produits haut de gamme du secteur de la céramique technique nécessitent une densification uniforme de la « poudre de pressage », qui peut s'obtenir en appliquant la même pression sur toutes les surfaces. Dans une presse isostatique, on remplit des moules en caoutchouc ou en polyuréthane de poudre céramique et on les place dans une cuve remplie de liquide. On applique ensuite une pression hydrostatique élevée, puis on démoule les produits.

Ce type de façonnage est parfaitement adapté à la fabrication de prototypes ambitieux et de petites séries, mais pour certains produits, le pressage isostatique peut être entièrement automatisé (bougies d'allumage, boulets de broyage, petits pistons, buses de soudage).

Pressage humide

Le pressage humide permet de fabriquer des pièces ayant des formes géométriques complexes, par exemple des filets de vis, des orifices latéraux et des gorges de dégagement. Les matières non cuites utilisées pour cela ont des taux d'humidité généralement compris entre 10 et 15 %. La compression à axe unique permet à ces matières de s'écouler librement, ce qui rend possible une compression relativement uniforme. L'inconvénient, en revanche, est que les matières pressées par voie humide ne peuvent subir que de faibles déformations par compression. Cela signifie également que le degré de compression est limité. Il dépend largement de la teneur en eau de la matière non cuite, et il est inférieur à celui des pièces pressées à sec.

Par ailleurs, dans certains cas, il faut sécher les pièces pressées avant de les faire cuire. C'est sur ce critère que reposent les tolérances moyennes selon la norme DIN 40680-1.

Extrusion

L'extrusion s'effectue au moyen d'extrudeuses à piston ou de presses à vis sous vide. Lors du procédé de façonnage plastique, par exemple pour la fabrication d'isolants électriques, on façonne la « pâte d'extrusion » (dont la teneur en eau se situe entre 20 et 25 % ou entre 19 et 23 % pour l'extrusion des isolants haute tension) dans une extrudeuse pour lui donner la forme géométrique souhaitée, on la découpe en tronçons et on procède à un façonnage supplémentaire à l'aide de tours [1, BMLFUW, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

L'extrusion peut également servir à fabriquer d'autres pièces symétriques en rotation, telles que des essieux ou des tuyaux. Des profils complexes peuvent être créés, en outre, grâce à des buses d'un modèle approprié. La longueur des billettes à fabriquer dépend en grande partie de la tendance à se déformer de la matière traitée.

Moulage par injection

Le moulage par injection convient plus particulièrement à la fabrication en série de produits complexes. Il est limité par des coûts relativement élevés et par la complexité de l'élimination par combustion des additifs organiques. La capacité de transport (« capacité par coup ») d'une grosse machine à mouler par injection peut généralement aller jusqu'à environ 70 g. En règle générale, la pièce doit être conçue de telle sorte que ses épaisseurs soient aussi régulières que possible, avec une limite supérieure d'environ 12 mm.

Coulage en barbotine

Le coulage en barbotine est une méthode simple qui permet de fabriquer des prototypes, des pièces de formes géométriques complexes et des produits relativement gros. On peut l'employer pour fabriquer soit des produits pleins, soit des produits à paroi mince. Le coulage en barbotine céramique consiste à verser une suspension stable, appelée barbotine, dans un moule en plâtre poreux et absorbant. Avec l'extraction du liquide en suspension, il se forme une couche de particules sur la paroi du moule. Cette couche grossit, en coulage plein, pour créer un corps entièrement moulé. Dans le cas du coulage en creux, on vide l'excédent de barbotine une fois qu'on a obtenu une épaisseur de paroi correcte.

Coulage en bande

Le coulage en bande consiste à verser une barbotine céramique contenant divers additifs organiques sur une bande d'acier sans fin transportée par des rouleaux. Cette barbotine s'écoule de façon continue d'un réservoir sur la bande, en passant par une fente réglable. On insuffle de l'air chaud sur la bande, dans le sens opposé, pour la sécher, de sorte qu'au bout de la bande, grâce aux additifs organiques, on obtient un ruban souple de céramique crue. Ce ruban peut être enroulé et stocké pour des transformations ultérieures, ou il peut être transformé immédiatement par découpe, poinçonnage, estampage ou autres méthodes similaires. Le coulage en bande s'emploie généralement pour fabriquer des pièces en céramique d'une épaisseur allant de 0,25 à 1,0 mm. Les produits ainsi formés sont utilisés pour la fabrication de substrats, de boîtiers, de condensateurs et de transducteurs multicouches.

2.3.8.4 Usinage

Comme le montre la figure ci-après, on peut distinguer entre l'usinage vert (après séchage), l'usinage blanc (après élimination par combustion et pré cuisson) et l'usinage dur (après cuisson/frittage) [24, VKI-Germany, 2004]

Ceramic production	Fabrication des céramiques
Shaping the green body	Façonnage de la pâte crue
Pre-firing	Précuisson
Sintering	Frittage
Inspection, packing	Contrôle, emballage
Production stages	Stades de fabrication
Green machining	Usinage vert
White machining	Usinage blanc
Hard machining	Usinage dur
Manufacturing process	Procédé de fabrication
Creating complex shapes	Création de formes complexes
Cutting	Découpe
Stamping	Estampage
Drilling	Perçage
Turning	Tournage
Sawing	Sciage
Grinding	Meulage
Improving dimension, shape tolerances and surface quality	Amélioration des dimensions, des tolérances de forme et de la qualité de surface
Laser cutting	Découpe au laser
Abrasive cutting	Découpe abrasive
Grinding	Meulage
Honing	Pierrage
Lapping, polishing	Rodage, polissage
Electrodischarge machining (EDM)	Usinage par électroérosion

Figure 2.28 : Usinage vert, blanc et dur dans la fabrication des céramiques techniques

L'usinage vert se pratique sur des pièces sèches alors qu'elles contiennent encore des additifs organiques. Il convient parfaitement à la fabrication de pièces individuelles et de petites séries. Il s'emploie également dans les grandes séries, pour fabriquer des formes que les opérations de façonnage initiales ne permettent pas de réaliser directement, par exemple des trous transversaux par rapport au sens du pressage à sec.

L'usinage blanc s'effectue sur des pièces précuites et désormais débarrassées de leurs additifs organiques. Leur résistance dépend de la précuisson. Ainsi, on peut obtenir des taux d'élimination extrêmement élevés avec une usure relativement faible des outils, en utilisant des outils classiques revêtus de céramique ou de diamant. Les fabricants emploient ce procédé à la fois pour la fabrication de prototypes et pour la fabrication en série.

L'usinage dur se pratique sur des articles entièrement cuits/frittés et auxquels on a donné des dimensions aussi proches que possible des dimensions définitives par façonnage ou par usinage vert ou blanc. Une dernière opération d'usinage consistant à enlever de la matière permet d'obtenir les tolérances les plus précises possible. Des critères très stricts en matière de précision dimensionnelle et la grande diversité des formes géométriques et des qualités de surface supposent l'utilisation de machines outils perfectionnées pour la transformation des composants céramiques. En raison de l'extrême dureté des matières céramiques, on utilise alors presque exclusivement des outils à diamant (aggloméré ou en pâte).

2.3.8.5 Emaillage, engobage et métallisation

Emaillage et engobage

L'application d'un émail rend les surfaces lisses et plus agréables visuellement mais surtout, cet émail peut nettement améliorer de nombreuses propriétés techniques importantes du produit céramique (par exemple, sa tenue électrique, sa résistance mécanique, sa résistance aux produits chimiques etc.). L'incorporation de colorants (oxydes métalliques) permet d'obtenir des émaux de couleurs extrêmement variées. Afin d'obtenir une éventuelle augmentation de la résistance, il faut que le coefficient de dilatation thermique de l'émail corresponde très exactement à celui de la pâte. Une légère contrainte de compression de l'émail augmente la résistance du produit fini, mais une contrainte de traction réduit cet effet, ce qui n'est pas souhaitable. Contrairement à l'émaillage,

l'engobe est poreux et essentiellement exempt de matière en phase vitreuse. Il est généralement constitué d'oxydes résistants au feu (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , ZrO_2), de mélanges de ceux-ci, ou de minéraux résistants au feu comme la mullite, les spinelles, le silicate de zircon, voire de kaolin ou d'argile. Les engobes sont utilisés dans les fours industriels, pour protéger les surfaces céramiques des attaques mécaniques ou corrosives. Appliqué à des accessoires d'enfournement tels que plaques, barres ou caissons, l'engobe empêche à la fois les réactions de contact avec les matériaux de cuisson supportés et l'adhérence d'une éventuelle coulée d'émail provenant des articles de cuisson qui sont posés sur les accessoires d'enfournement enduits [24, VKI-Germany, 2004]

Une fine couche minérale d'émail ou d'engobe s'applique sur une surface céramique par trempage, roulage, pulvérisation ou application au pinceau.

Métallisation

Certains fabricants de céramiques techniques proposent des céramiques métallisées. L'oxyde d'aluminium et le nitrure d'aluminium servent de matériau de substrat. La métallisation proposée, qui convient au brasage ainsi qu'au soudage tendre, est constituée d'une métallisation de base de tungstène avec une épaisseur de couche d'au moins 6 μm , appliquée par sérigraphie. On applique par-dessus, par voie non électrolytique, une couche de nickel d'une épaisseur de 2 μm au minimum pour favoriser l'écoulement de la brasure. On peut également déposer une couche d'or d'une épaisseur d'environ 1 μm , comme protection contre la corrosion. On peut aussi renforcer la couche de nickel appliquée par voie non électrolytique par une couche d'or pouvant être liante. On peut également appliquer une couche supplémentaire d'étain si on effectue un soudage tendre [24, VKI-Germany, 2004].

2.3.8.6 Séchage, élimination par combustion et précuisson

Séchage

En fonction des très nombreuses matières premières et variantes de procédé, qui sont adaptées pour obtenir les propriétés spécifiques des produits, on utilise différents types de séchoirs, mais ce sont souvent des séchoirs à chambre qu'on utilise, notamment dans le cadre d'une fabrication en petite série.

Élimination par combustion

Les corps crus qui sont façonnés à partir d'une matière plastique résistent généralement à la rupture dans cet état, mais on peut encore améliorer cette résistance grâce aux additifs organiques. En revanche, ces additifs sont indispensables lorsque la matière non cuite est non plastique. Pour éliminer par combustion les plastifiants et liants résiduels ainsi que les autres additifs organiques, il faut un profil de température-pression-atmosphère-temps adapté, afin d'obtenir une élimination non destructive et reproductible de ces additifs dans le corps cru finement poreux. Une variante de cette élimination par combustion s'appelle la « carbonisation » ou la « cokéfaction », et se fait par exemple avec du SiC. Ici, les composants organiques se transforment en carbone, lequel reste dans la structure et se transforme, grâce à l'ajout de réactifs, en une matrice céramique pendant la réaction de frittage. A l'issue du séchage et de l'élimination par combustion (ou de la carbonisation/cokéfaction), la structure du corps cru (poudre pressée ayant la forme de l'élément) ne tient que grâce à de faibles forces de cohésion, et nécessite d'être manipulée avec extrême précaution lors des étapes de traitement consécutives. C'est la raison pour laquelle le séchage et l'élimination par combustion sont intégrés à la cuisson/au frittage à chaque fois que c'est possible [24, VKI-Germany, 2004].

Précuisson

Afin de réduire le niveau de risque au cours de la manutention, et pour permettre également un usinage blanc, on peut renforcer le corps cru formé en le faisant cuire avec un retrait relativement faible au cours d'une cuisson préliminaire. Il faut pour cela que la résistance et le retrait puissent être reproduits grâce à un contrôle des paramètres du procédé [24, VKI-Germany, 2004].

2.3.8.7 Cuisson/Frittage

Du fait de l'extrême diversité des matières premières et des variantes de procédé, on utilise différents types de four pour la cuisson. La fabrication à petite échelle se fait dans des fours intermittents flexibles tels que des fours intermittents, qui fonctionnent de manière à modifier la courbe de cuisson spécifique aux produits dans des cycles très courts.

Le tableau suivant présente des températures de frittage types pour les céramiques techniques [24, VKI-Germany, 2004].

Céramique technique	Température de frittage (°C)
Porcelaine alumineuse	environ 1250
Porcelaine de quartz	environ 1300
Stéatite	environ 1300
Cordiérite	1250 - 1350
Oxyde d'aluminium	1600 - 1800
Carbure de silicium recristallisé	2300 - 2500
Carbure de silicium fritté	environ 1900
Nitride de silicium	environ 1700

Tableau 2.24 : Températures de frittage des céramiques techniques

L'énergie nécessaire au procédé de cuisson augmente de façon disproportionnée au fur et à mesure que la température de cuisson augmente. Outre l'apport en énergie, les auxiliaires de cuisson (« matériel d'enfournement ») qu'on utilise pour empiler les corps crus dans le four sont faits d'une matière réfractaire qui peut résister à de très hautes températures. On peut créer des variétés spéciales de cette matière avec certaines céramiques, en utilisant certains types de procédé de cuisson [24, VKI-Germany, 2004].

Pressage à chaud (HP)

Le pressage à chaud s'utilise pour fabriquer des composants ayant une densité proche de la limite maximale théorique. C'est un procédé de frittage qui repose sur un pressage uniaxe.

Pressage isostatique à chaud (HIP)

Le pressage isostatique à chaud permet notamment que de petites pièces aient une densité maximale, grâce à l'application d'une pression gazeuse isostatique pouvant atteindre 3000 bars à des températures pouvant atteindre environ 2000 °C (généralement à l'intérieur d'une enveloppe de verre de silice déformable).

Un exemple de cuisson de céramiques techniques dans de gros fours intermittents est la fabrication d'isolants électriques au moyen d'un programme de modulation de température (capacité de four de 100 m³ avec une densité d'enfournement de 260 kg/m³, température de cuisson pouvant aller jusqu'à 1300 °C, temps de cuisson incluant une phase de refroidissement de 80 à 150 heures) et en utilisant du gaz naturel comme combustible [1, BMLFUW, 2003].

Un autre exemple d'utilisation de fours intermittents est la fabrication des auxiliaires de cuisson (« matériel d'enfournement ») [17, Burkart, 2004] :

- les cassettes en H, qui sont façonnées à partir d'argiles réfractaires spéciales, sont cuites dans des fours intermittents (densité d'enfournement inférieure à 300 kg/m³, volume du four 12 m³) à une température de 1360 à 1390 °C, avec du gaz naturel comme source d'énergie. On les utilise comme auxiliaires de cuisson dans les procédés de fabrication des tuiles
- les auxiliaires de cuisson en SiC, qui sont façonnés à partir de poudre de SiC et de liants organiques, sont cuits dans des fours intermittents à induction électrique (densité d'enfournement inférieure à 300 kg/m³), à une température de 2000 à 2500 °C et sous atmosphère d'hydrogène/azote. On les utilise dans d'autres procédés de fabrication, notamment pour la cuisson d'émail rapide des porcelaines.

Néanmoins, on emploie également des fours tunnels pour fabriquer les céramiques techniques. Un exemple est la cuisson de catalyseurs céramiques dans un four tunnel de 63 m de long, à une température maximale de 650 °C et avec un débit de 0,76 m³/h [1, BMLFUW, 2003].

2.3.8.8 Traitements ultérieurs

En fonction des types extrêmement divers de céramiques techniques, des traitements supplémentaires sont parfois nécessaires, comme la découpe, le sciage, le meulage, le polissage et l'assemblage avec d'autres pièces. A ce sujet, voir la section 2.3.8.4 notamment en ce qui concerne l'usinage dur. A l'issue du contrôle de qualité final, les produits sont triés et emballés.

2.3.8.9 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques techniques

Les principaux flux d'entrée et de sortie des procédés de fabrication des céramiques techniques sont présentés sur la figure ci-après [23, TWG Ceramics, 2005], [24, VKI-Germany, 2004].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> binding agents, plastifier, (plaster), sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> agents liants, plastifiant, (plâtre), agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clays, chamotte, natural rocks, synth. raw materials	<u>Matières premières</u> argiles, chamotte, roches naturelles, matières premières synth.
Manufacture of technical ceramics	Fabrication des céramiques techniques
Technical ceramics	Céramiques techniques
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC), (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV), (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, (used plaster moulds), sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, (moules en plâtre usagés), boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.29 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des céramiques techniques

2.3.9Abrasifs inorganiques

2.3.9.1 Matières premières

Les abrasifs inorganiques sont constitués de grains abrasifs, d'agents liants et de plusieurs additifs qui sont malaxés, façonnés, séchés et cuits [14, UBA, 2004].

Les grains abrasifs les plus utilisés pour la fabrication des abrasifs inorganiques sont les alumines spéciales fondues, le corindon, le carbure de silicium noir et vert. On utilise aussi le nitrure de bore cubique (CBN) et le diamant.

L'agent liant est généralement composé des éléments suivants :

- feldspath
- silicates
- quartz
- frites (verre de composition prédéfinie)
- kaolin
- argile
- néphéline
- pigments.

Cette composition varie en fonction du profil d'application des abrasifs. Par conséquent, on peut également utiliser des liants en fritte pure ou des liants spéciaux ayant un coefficient de dilatation thermique et/ou un point de fusion prédéfinis. Dans certains cas, les frites peuvent contenir des fractions importantes d'alcalis et de bore. On peut ajouter des oxydes métalliques colorants, du verre colorant ou des pigments colorants pour obtenir telle ou telle couleur.

Lors de la fabrication des abrasifs inorganiques, on utilise également des substances auxiliaires pour obtenir les caractéristiques et les formes requises. Toutefois, ces substances auxiliaires ne constituent pas des ingrédients du produit final.

Pour fabriquer des abrasifs inorganiques, il faut des agents liants temporaires pour que le mélange de grain et de liant conserve sa forme avant la cuisson. Pour ces liants temporaires, on utilise, au choix, des colles hydrosolubles, des émulsions de cire, de l'amidon transformé de type dextrine, des préparations au polyoxyéthylène, des lignosulfonates, des produits de condensation d'urée-formaldéhyde transformés, des résines synthétiques etc.

Les agents porogènes ont pour fonction de générer un certain profil poreux dans les abrasifs. Ces agents porogènes sont ajoutés aux matières premières et s'évaporent, se subliment, se dépolymérisent ou s'incinèrent, selon la substance utilisée, au cours du séchage ou de la cuisson. En fonction du produit final, on utilise tel ou tel agent porogène. On applique du naphthalène ou d'autres substances de calcination thermique.

2.3.9.2 Préparation des matières premières

La première étape du procédé de fabrication des abrasifs inorganiques consiste à peser et à mélanger (par exemple dans un mélangeur horizontal) les composants selon la formule de l'abrasif.

2.3.9.3 Façonnage

Pour fabriquer des abrasifs inorganiques, on comprime mécaniquement les pièces brutes jusqu'à obtention d'une densité donnée, selon des critères de forme et de poids par défaut. Pour ce faire, on utilise des presses hydrauliques ou à excentrique avec des plages de pression pouvant atteindre 2500 MPa [14, UBA, 2004].

2.3.9.4 Séchage

Au fur et à mesure que la matière comprimée est humectée par de l'eau contenant de la colle, il faut faire sécher la pièce brute. On utilise des séchoirs à chambre et des séchoirs sous vide, dans lesquels on fait sécher les produits à des températures comprises entre 50 et 150 °C. Pour un séchage sans fissures, il faut de longues durées de séchage, pouvant atteindre 45 heures, et on peut également climatiser les séchoirs (les séchoirs sous vide sont notamment équipés d'un dispositif de contrôle de l'humidité) pour obtenir un séchage sans fissures [14, UBA, 2004] [28, Schorcht, 2005].

2.3.9.5 Cuisson

La cuisson des abrasifs inorganiques s'effectue dans des fours intermittents ou continus, chauffés au gaz naturel ou à l'électricité. Les installations types ont des fours d'une capacité supérieure à 4 m³ (et pouvant atteindre 11 m³), des températures de cuisson comprises entre 850 et 1300 °C et des densités d'enfournement comprises entre 360 et 1400 kg/m³. La part du liant vitrifié dans les produits à cuire représente environ 10 % de la masse totale des abrasifs inorganiques se trouvant dans le four. Selon la dimension des produits de la meule abrasive, les cycles de cuisson durent entre 40 et 120 heures [28, Schorcht, 2005], [23, TWG Ceramics, 2005].

2.3.9.6 Traitements ultérieurs

Après avoir déterminé la qualité (grade, densité) de l'abrasif, on procède à la finition de celui-ci en respectant les critères spécifiques de la clientèle et en utilisant par exemple des tours ou des meuleuses assistés par ordinateur. Ensuite, on procède au contrôle final qui comporte en principe un contrôle d'équilibre, un contrôle dimensionnel, un test de l'anneau et un contrôle visuel, un essai en survitesse et un test de résistance à l'éclatement, par rapport aux normes. A l'issue de ce contrôle final, les abrasifs inorganiques sont étiquetés selon les normes en vigueur et emballés pour expédition [14, UBA, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

2.3.9.7 Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des abrasifs inorganiques

Les principaux flux d'entrée et de sortie des procédés de fabrication des abrasifs inorganiques sont présentés sur la figure ci-après [14, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

<u>Energy</u> electric power, fuel oil, natural gas, LPG	<u>Energie</u> électricité, fioul, gaz naturel, GPL
Water	Eau
<u>Auxiliary agents</u> binding agents, pigments, sorption agents, packaging material	<u>Agents auxiliaires</u> agents liants, pigments, agents de sorption, matériaux d'emballage
<u>Raw materials</u> clay, kaolin, natural rocks, synth. raw materials	<u>Matières premières</u> argile, kaolin, roches naturelles, matières premières synth.
Manufacture of inorganic bonded abrasives	Fabrication des abrasifs inorganiques
Inorganic bonded abrasives	Abrasifs inorganiques
Noise	Bruit
<u>Emissions to air</u> dust, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (VOC), (heavy metals)	<u>Emissions dans l'air</u> poussières, NO _x , SO _x , HF, HCl, CO, CO ₂ , (COV), (métaux lourds)
<u>Excess heat</u>	<u>Chaleur résiduelle</u>
<u>Process losses/waste</u> used filters, used sorption agents, sludge, broken ware, packaging waste, collected dust, particles and cuttings	<u>Déchets de production</u> filtres usagés, agents de sorption usagés, boues, déchets de casse, déchets d'emballages, poussière collectée, particules et coupes
<u>Process waste water</u>	<u>Eaux de process</u>

Figure 2.30 : Flux d'entrée et de sortie dans la fabrication des abrasifs inorganiques

3. NIVEAUX D'EMISSION ET DE CONSOMMATION COURANTS

3.1 Emissions – considérations générales

3.1.1 Emissions dans l'air

3.1.1.1 Poussières (particules)

Le traitement des argiles et autres matières premières céramiques conduit inévitablement à la formation de poussières – en particulier, dans le cas de matières sèches. Le séchage (notamment le séchage par atomisation), la fragmentation (concassage, broyage), le criblage, le mélange et le convoyage peuvent tous provoquer le soulèvement de fines poussières, ce qui demande un équipement de dépoussiérage. Des poussières se forment également au cours de la décoration et de la cuisson des céramiques, et pendant les opérations d'usinage ou de finition effectuées sur les céramiques cuites. La poussière est l'un des principaux polluants, en termes quantitatifs, produits par les procédés céramiques.

3.1.1.2 Emissions gazeuses

Les composés gazeux libérés pendant le séchage, la calcination et la cuisson sont dérivés des matières premières ainsi que des combustibles qui contribuent aux polluants gazeux. Les composés de fluorure représentent l'un des principaux polluants types issus des procédés céramiques. Les émissions gazeuses liées à l'industrie de la céramique sont telles que décrites dans les sections 3.1.1.2.1 à 3.1.1.2.7 :

3.1.1.2.1 Dioxyde de soufre et autres composés de soufre

La concentration en SO_x (SO_2 principalement) dans les effluents gazeux est étroitement liée à la teneur en soufre de la matière première et du combustible. Les matières céramiques peuvent contenir du soufre sous la forme de pyrite (FeS_2), gypse et autres sulfates, et des composés de soufre organiques. Les combustibles gazeux sont virtuellement exempts de soufre, mais les combustibles solides et les fiouls contribuent à la formation des oxydes de soufre pendant la combustion.

Il est à noter que des composés de base issus de matières premières (par exemple, le CaO formé par dissociation du CaCO_3 pendant la cuisson) peuvent réduire les émissions de soufre par réaction avec des oxydes de soufre. Les produits de réaction sont contenus dans la pâte céramique.

3.1.1.2.2 Oxydes d'azote et autres composés de l'azote

Les NO_x sont principalement produits par « fixation » thermique de l'azote et de l'oxygène provenant de l'air de combustion. Cette réaction est favorisée par de hautes températures (en particulier $> 1200^\circ\text{C}$) et par l'excédent d'oxygène. La fixation peut se produire au sein de flammes très chaudes, même lorsque les températures réelles du four sont en deçà de 1200°C .

Les composés de l'azote présents dans les combustibles (de types solide ou liquide principalement), ou dans les additifs organiques, forment des NO_x pendant la combustion à des températures bien inférieures.

3.1.1.2.3 Monoxyde de carbone (et dioxyde de carbone)

Le monoxyde de carbone, CO, résulte de la combustion de matière organique dans la pâte céramique – en particulier dans des conditions de faible teneur en oxygène. Il peut également être formé par la réaction du « carbone fixe » se trouvant dans la pâte avec le dioxyde de carbone (CO₂) libéré par la dissociation thermique de l'alcali et des carbonates alcalino-terreux, par exemple, du carbonate de calcium ou de magnésium, pendant la cuisson :

- $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$

(le dioxyde de carbone se forme comme indiqué ci-dessus et est le principal oxyde de carbone formé pendant la combustion de combustibles fossiles).

3.1.1.2.4 Composés organiques volatils (COV)

Les matières premières céramiques peuvent contenir elles-mêmes une matière organique, et un large éventail de matières organiques sont ajoutées sous la forme d'agents liants, d'agents porogènes, d'agents facilitant le séchage, d'adhésifs, de pâtes combustibles, d'additifs de combustion etc.

Au début du processus de chauffe, la carbonisation de composés organiques peut se produire avec la libération d'un éventail complexe de COV.

3.1.1.2.5 Les métaux et leurs composés

La teneur en métaux lourds de la plupart des matières premières céramiques est très faible, et n'entraîne aucun problème d'émission. Des exceptions se produisent dans le cas des pigments céramiques et des composants de l'émail, mais la pratique actuelle consiste à utiliser des composés colorés (pigments contenant un « colorant »), qui sont stables à des températures élevées et inertes dans des systèmes de silicate, où les oxydes métalliques ont une structure cristalline stable comme la spinelle et le zircon [23, TWG Ceramics, 2005]. Ces types d'émail sont également sujets à des cycles de cuisson extrêmement courts, minimisant le risque de volatilité.

Les fiouls lourds et les combustibles solides peuvent contenir de bas niveaux de nickel et de vanadium, mais des essais ont indiqué que ces éléments sont largement absorbés par une réaction avec le produit pendant la cuisson.

3.1.1.2.6 Le chlore et ses composés

La plupart des argiles contiennent de faibles niveaux de chlorure, souvent dérivés d'une formation originale en mer, mais des additifs ou de l'eau contenant du chlorure sont également des sources possibles d'émissions d'acide chlorhydrique (HCl) (par exemple, la teneur en Cl de l'eau ajoutée pendant la préparation des matières premières peut être dans la plage de 50 – 100 mg/l ou même plus élevée) [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]. En raison de la décomposition des sels minéraux contenant du chlorure à des températures dépassant 850°C et des composés organiques contenant du chlorure à des températures comprises entre 450 et 550°C, du HCl est produit pendant le procédé de cuisson dans les effluents gazeux d'un four [25, Voland, 2004].

3.1.1.2.7 Le fluor et ses composés

Presque toutes les matières premières naturelles contiennent des quantités fractionnelles de fluorure (qui remplace facilement les groupes OH dans les argiles et minéraux hydratés). L'acide fluorhydrique (HF) vient principalement de la décomposition des fluosilicates présents dans la matière argileuse. L'émission de HF se produit selon deux mécanismes différents :

- par la décomposition directe des minerais de fluorure qui dépend fortement du type d'argile (par exemple, smectite à des températures à partir de 550°C, illite à des températures à partir de 750°C, apatite à des températures de 600 à 700°C)
- par la décomposition du CaF_2 à des températures dépassant les 900°C, la réaction est favorisée par la présence de vapeur d'eau [23, TWG Ceramics, 2005], [25, Volland, 2004].

Dans ce contexte, l'eau, présente dans l'atmosphère du four (par exemple, formée par la combustion des combustibles), joue un rôle important dans le mécanisme de formation de HF. Les réactions suivantes sont impliquées :

- $\text{F minéral} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH minéral} + \text{HF}$ (1) (libération de HF par hydrolyse du F minéral)
- $2\text{HF} + \text{CaO} \rightarrow \text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (2) (résorption de HF)
- $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HF} + \text{CaO}$ (3)

La réaction (2) se produit à des températures relativement basses, dans la section de préchauffage du four. Ceci explique pourquoi la présence de CaCO_3/CaO (calcaire/chaux) peut entraîner une réduction significative des émissions de HF. Un préchauffage lent augmente le temps de réaction pour la résorption et peut entraîner des émissions de HF plus faibles. La réaction (3) se produit à des températures plus élevées ($> 900^\circ\text{C}$) si la concentration en eau dans le four est très élevée [2, VITO, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

La concentration de fluorure dans les effluents gazeux n'est pas seulement liée à son niveau dans les matières premières, à la présence de vapeur d'eau, à la composition de la pâte et à la courbe de température, mais l'enfournement et la surface spécifique de la céramique devant être cuite affectent également la diffusion de H_2O et de HF dans et hors de la céramique (voir sections 4.3.3.1 et 4.3.3.2) [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

3.1.2Emissions dans l'eau

L'eau est une matière première très importante pour l'industrie de fabrication des céramiques, mais la quantité utilisée varie fortement d'un secteur à l'autre, ainsi que d'un procédé à l'autre. L'eau ajoutée directement aux mélanges de pâte céramique ne conduit pas à un problème d'eaux usées, étant donné qu'elle est par la suite évaporée dans l'air pendant les étapes de séchage et de cuisson. Les eaux de process sont principalement générées lorsque des matières argileuses sont rincées et mises en suspension dans l'eau en circulation pendant le procédé de fabrication et le nettoyage des équipements, mais des émissions dans l'eau résultent également du fonctionnement des laveurs d'effluents gazeux par voie humide.

Des eaux de process sont produites en faible quantité dans la fabrication de briques et de tuiles, de tuyaux en grès et de produits réfractaires, si un traitement de surface tel que l'émaillage et l'engobage ou le meulage humide est effectué. Des quantités d'eau supplémentaires sont utilisées dans le procédé de nettoyage des unités de mélange, engobage et émaillage, et des moules. Dans la production de granulats d'argile expansée, aucune eau de process n'est généralement produite, seule l'eau de refroidissement pour le système de four passe à travers un séparateur d'huile et est renvoyée au circuit de refroidissement.

Dans les secteurs des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques, des eaux de process sont principalement produites sous la forme d'eau de nettoyage dans les unités de préparation, dans les unités de coulage, dans le procédé d'émaillage et de décoration ou sous la forme d'eau de meulage dans un traitement ultérieur.

Les effluents résultant d'un traitement de composés et d'un nettoyage des équipements contiennent d'ordinaire les mêmes matières premières et matières auxiliaires que celles utilisées dans le procédé concerné. En règle générale, ces composés sont solubles dans l'eau.

Les eaux usées dans le procédé présentent pour la plupart une certaine turbidité et coloration en raison des très fines particules en suspension de l'émail et de minéraux argileux. D'un point de vue chimique, elles sont caractérisées par la présence de :

- matières en suspension : argiles, frites et silicates insolubles en général
- anions dissous : sulfates
- métaux lourds en suspension et dissous : par exemple, le plomb et le zinc
- bore en petites quantités
- traces de matière organique (véhicules de sérigraphie et colles utilisées dans les opérations d'émaillage).

3.1.3 Déchets de production

Les déchets de production provenant de la fabrication de produits céramiques comprennent principalement les matières suivantes:

- différents types de boue sont issues des installations de traitement des eaux de process pour les eaux provenant des procédés impliqués dans le nettoyage des équipements de préparation de la pâte, de préparation et d'application de l'émail, et provenant également d'un meulage humide. La quantité et la composition de la boue varient considérablement car, en plus de résulter des différents procédés de production, une grande variété de matières premières tendent à être utilisées (différents émaux, frites, argiles etc.), même au sein de la même installation, ce qui produit des fluctuations significatives dans la composition de la boue
- des produits/céramiques sont cassés après façonnage, séchage, cuisson, traitement ultérieur et des éléments réfractaires sont cassés
- de la poussière est produite par les unités d'épuration des effluents gazeux
- des moules de plâtre usagés résultent des procédés de façonnage
- des agents de sorption usagés (calcaire granulaire, poussière de calcaire) résultent des systèmes d'épuration des effluents gazeux
- des déchets d'emballage (plastique, bois, métal, papier etc.) résultent de l'étape d'emballage
- des résidus solides, par exemple, des cendres résultent de la combustion avec des combustibles solides.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont expédiées hors de l'usine pour servir à d'autres industries ou sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets.

3.1.4 Emissions de bruit

Du bruit se produit lors des différentes étapes des procédés de fabrication de produits céramiques, en raison principalement du fonctionnement de machines génératrices de bruit et du fait de la mise en œuvre de procédures de travail bruyantes.

3.1.5 Possibles sources d'émission et voies d'émission

Le tableau suivant fournit un aperçu des sources d'émission possibles des étapes de procédé importantes dans la fabrication de céramiques et des voies d'émission correspondantes [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [27, VDI, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Etape de procédé	Emissions de				Emissions dans			Emission de bruit
	Matière première	Pâtes de céramique	Décoration	Combustible	Air	Eau	Sol (déchets de production)	
Préparation des matières premières								
Concassage primaire/secondaire et broyage	X				X		X	X
Meulage par voie sèche et mélange à sec	X			X ⁽¹⁾	X		X	X
Meulage par voie humide et mélange humide	X					X	X	X
Criblage/classification	X				X		X	X
Transport	X				X		X	X
Stockage en silos	X				X			X
Préparation de la pâte								
Barbotine de coulage		X				X		
Pâte d'extrusion pour le façonnage plastique mou		X			X	X	X	
Pâtes pour le façonnage plastique dur par procédés d'élimination d'écailles		X				X	X	
Poudre de pressage, procédé par voie sèche		X			X	X	X	X
Poudre de pressage, procédé de séchage par atomisation		X		X	X	X	X	X
Granulation		X			X			X
Façonnage								
Coulage en barbotine		X				X		
Façonnage plastique mou (« extrusion »)		X				X	X	
Façonnage par découpe		X					X	
Pressage		X			X	X ⁽²⁾	X	X
Traitement des pâtes crues		X			X	X	X	
Séchage								
Séchoirs intermittents et continus		X		X	X			X
Décoration								
Emaillage			X		X	X	X	
Engobage			X		X ⁽³⁾	X	X	
Impression			X		X	X	X	
Cuisson								
Fours intermittents et continus	X	X	X	X	X			X
Traitement ultérieur		X	X		X	X	X	X
Stockage de matière	X	X		X	X ⁽⁴⁾			X
1) Possible pour des applications spéciales, par exemple, un meulage sec à chaud de granulats en argile expansée								
2) Eau de refroidissement seulement								
3) Pour certains secteurs, par exemple, carreaux céramiques								
4) Le stockage de matière couvre également le stockage des combustibles								

1) Possible pour des applications spéciales, par exemple, un meulage sec à chaud de granulats en argile expansée

2) Eau de refroidissement seulement

3) Pour certains secteurs, par exemple, carreaux céramiques

4) Le stockage de matière couvre également le stockage des combustibles

Tableau 3.1 : Aperçu sur les sources d'émission et les voies d'émission possibles dans l'industrie céramique

3.2 Consommation – considérations générales

3.2.1 Consommation d'énergie

Dans l'industrie céramique, la principale consommation d'énergie est celle de la cuisson au four et, dans nombre de procédés, le séchage des produits intermédiaires ou façonnés est également gourmand en énergie. Le gaz naturel, le GPL et le fioul sont employés pour la plupart des opérations de séchage et de cuisson, mais les combustibles solides, l'électricité, le GNL et le biogaz/la biomasse sont également utilisés.

L'usine et les machines utilisées pour la fragmentation et le mélange des matières premières, ainsi que les procédés de formage des produits, requièrent de l'énergie électrique. Du carburant diesel est nécessaire pour le transport sur site, qui peut inclure le transport de matières premières depuis la carrière et le transport interne avec des camions. En outre, de l'électricité (alimentation par piles ou

accumulateurs) et des bouteilles de GPL (butane, propane) sont également utilisées pour le transport sur site, par exemple, dans le cas des chariots élévateurs.

Les secteurs des briques et tuiles et des carreaux pour sols et murs sont les plus gros consommateurs d'énergie, mais ceci est relatif à leurs plus grands rendements en tonnage. En termes de consommation d'énergie spécifique, le secteur des briques et tuiles présente la plus grande efficacité [3, CERAM-UNIE, 2003].

Il doit être entendu que le chauffage électrique des fours est néanmoins employé pour la fabrication de certains produits de vaisselle et de céramiques techniques [14, UBA, 2004], [17, Burkart, 2004]. Ceci est nécessaire pour obtenir la qualité requise.

3.2.2 Consommation d'eau

L'eau s'utilise dans la quasi-totalité des procédés céramiques et une eau de bonne qualité est indispensable pour la préparation des argiles et des émaux, des pâtes argileuses pour l'extrusion, des « compositions » de moulage, pour la préparation des poudres séchées par atomisation, pour le meulage par voie humide ou pour les opérations de lavage et de nettoyage.

De l'eau est utilisée pour différents produits : en principe, en tant que matière première pour la pâte et sa préparation, en tant que matière première pour les émaux, en tant que liquide de lavage et en tant qu'agent de refroidissement. Une eau de bonne qualité est requise pour les émaux, le lavage et le refroidissement. Une eau de faible qualité – comme les eaux de process non traitées issues des opérations de lavage dans la section d'émaillage – peut être appropriée pour la pâte. Les techniques de réutilisation des eaux de process prennent ces différentes qualités en compte.

3.2.3 Consommation de matières premières

Comme indiqué dans le chapitre 2, l'industrie céramique est consommatrice d'un vaste éventail de matières premières. Cela comprend les matières qui constituent la pâte principale, lesquelles représentent des tonnages élevés, et les différents additifs, agglomérants et matériaux de décoration appliqués en surface, qui s'utilisent à plus petite échelle.

3.3 Présentation de données d'émission et de consommation

Cette section se rapporte aux plages de niveaux d'émission et de consommation actuellement observés pour les procédés de fabrication. Les informations comprennent l'usage actuellement observé de l'énergie, de l'eau et des matières premières et, autant que possible, les données comprennent les émissions dans l'air et dans l'eau issues des activités, ainsi que les entrées et sorties de sous-procédés comprenant les compositions de boue et les déchets de production solides. Les données d'émission de bruit ne sont pas incluses, car de nombreux aspects de bruit ne sont pas réellement spécifiques au secteur et des données d'émission de bruit appropriées ne sont pas disponibles pour les procédés de fabrication de céramique.

Les données de performance seront qualifiées autant que possible par des détails sur les conditions de fonctionnement, les procédés d'échantillonnage et analytiques, et les présentations statistiques (par exemple, moyennes, maximums, minimums et plages).

En ce qui concerne les conditions standard des mesures de débits volumétriques et de concentrations, le lecteur pourra se reporter aux définitions suivantes, qui figurent également au glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, les débits volumétriques correspondent à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des effluents gazeux secs à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal et les concentrations en benzène correspondent à 15 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
état normal	désigne une température de 273 K et une pression de 1013 hPa.

Des informations utiles supplémentaires figurent dans le document de référence sur les principes généraux de contrôle (MON).

Au vu de la complexité de l'industrie de la céramique, les données sous la forme d'exemples et de plages de niveaux d'émission et de consommation actuellement observés sont résumées sur une base sectorielle dans les tableaux et sur les figures de la présente section.

3.3.1 Briques et tuiles

3.3.1.1 Données d'émission

La fabrication de briques et de tuiles donne lieu à des émissions dans l'air et l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit. Dans la présente section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson des briques et des tuiles. Les émissions dans l'air provenant d'autres étapes de procédé, les émissions dans l'eau et les déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Des émissions importantes dans l'air lors de la fabrication de briques et de tuiles se produisent dans le procédé de cuisson. Dans ce contexte, il doit être mentionné que les émissions varient dans une grande mesure d'un pays à l'autre et au sein des pays, d'un site à l'autre, en fonction des différentes matières premières argileuses utilisées – en raison des variations géologiques et géographiques – comme décrit dans la section 2.3.1.1 (voir en particulier, le tableau 2.1) et également en fonction des différences des techniques de fabrications appliquées pour s'adapter à la diversité de l'éventail de produits.

Dans ce contexte, les données indiquées dans le tableau suivant, montrent les plages d'émissions produites dans certains pays européens pour les fluorures, chlorures, oxydes de soufre, oxydes d'azote, poussières et monoxyde de carbone. L'ensemble des données fournies dans ce tableau sont les émissions dans les effluents gazeux non épurés sortant des fours, à savoir, sans tenir compte des équipements de réduction [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [21, Almeida, 2004].

Composant d'émission (mg/m ³)	Autriche	France	Pays-Bas	Italie	Danemark ^{*)}
Fluorure en équivalent HF					
Minimum	0	1	1	0	10
Maximum	60	130	150	350	150
Chlorure en équivalent HCl					
Minimum		0	1	0	5
Maximum		30	32	200	50
Soufre en équivalent SO_x					
Minimum	5	0	2	0	20
Maximum	100	1090	630	3200	700
Azote en équivalent NO_x					
Minimum	9	5	27	5	50
Maximum	80	200	464	100	200
Poussières					
Minimum	0	1	1	1	5
Maximum	13	180	64	40	40
Monoxyde de carbone					
Minimum		0	7	100	
Maximum		1200	701	500	
*) La référence de concentration en oxygène de 15 – 19 % en volume correspondant à la teneur en oxygène mesurée des effluents gazeux					

Composant d'émission (mg/m ³)	Belgique	Royaume-Uni	Allemagne	Hongrie	Suisse	Portugal
Fluorure en équivalent HF						
Minimum	6	1	1	0	0	1
Maximum	117	200	250	20	22	80
Chlorure en équivalent HCl						
Minimum	0	1	0			Non détecté
Maximum	270	125	95	50		160
Soufre en équivalent SO_x						
Minimum	3	8	1	1	1	3
Maximum	3485	2450	3000	350	281	443
Azote en équivalent NO_x						
Minimum	0	0	10	0	36	14
Maximum	174	160	450	780	147	132
Poussières						
Minimum	2	0	5	1	1	8
Maximum	449	100	150	100	29	125
Monoxyde de carbone						
Minimum	23		0	1	7	2
Maximum	1950		1500	1500	483	500

Tableau 3.2 : Plages d'émission des effluents gazeux bruts provenant du procédé de cuisson de fabrication des briques et des tuiles

Les émissions de fluorure varient considérablement, comme le montre le tableau 3.2, non seulement en raison de la variation de la teneur en fluorure des matières premières, mais également en raison des différences des techniques de fabrication utilisées. Par exemple, la figure suivante montre la distribution du fluorure libéré par rapport au produit final, sur la base d'une recherche italienne et en faisant référence à la figure 2.9 [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Sample number	Numéro d'échantillon
mg/kg	mg/kg

Figure 3.1 : Distribution du fluorure libéré dans l'industrie italienne des briques et des tuiles

Des variations similaires se produisent dans les émissions de chlorure (voir tableau 3.2), et la distribution du chlorure libéré par rapport au produit final pour l'industrie italienne des briques et des tuiles est également représentée sur la figure suivante [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

Sample number	Numéro d'échantillon
mg/kg	mg/kg

Figure 3.2 : Distribution du chlorure libéré dans l'industrie italienne des briques et des tuiles

Le tableau suivant montre les émissions de soufre différentes en Allemagne, au Royaume-Uni et en Belgique, présentées comme une relation entre le nombre de fabriques de briques et de tuiles et les plages d'émission correspondantes. En outre ici, la variation de la teneur en soufre dans les argiles (voir figure 2.12) joue un rôle important, par exemple, en utilisant des argiles ayant une faible teneur en soufre, les plages des émissions de soufre sont inférieures à celles obtenues en utilisant des argiles à une teneur élevée en soufre. [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Number of works	Nombre de fabriques
Concentration ranges in mg/m ³ SO _x	Plages de concentration en mg/m ³ SO _x
DE	Allemagne
UK	Royaume-Uni
BE	Belgique

Figure 3.3 : Emissions de SO_x en Allemagne, au Royaume-Uni et en Belgique

Les plages de données opérationnelles de gaz bruts sont présentées dans le tableau suivant en liaison avec les combustibles utilisés [4, UBA, 2001], [27, VDI, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005]

Composant d'émission	Unité	Combustible gazeux	Fioul EL	Fioul lourd	Charbon
Poussière	mg/m ³	1 – 20	1 - 30	5 – 50	30 – 150 ^{***})
NO _x en équivalent NO ₂	mg/m ³	20 – 200	20 - 200	20 – 200	20 – 200
SO _x en équivalent SO ₂ (teneur en S de la matière première < 0,12 % ^{*)})	mg/m ³	10 - 300 ^{**})	10 - 300 ^{**})	30 - 500 ^{**})	30 - 500 ^{**})
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	mg/m ³	1 - 20 ^{**})	1 - 20 ^{**})	1 - 20 ^{**})	1 - 20 ^{**})
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	mg/m ³	1 - 120	1 - 120	1 - 120	1 - 120
^{*)} Valeurs possibles supérieures à 1500 mg de SO ₂ /m ³ avec une teneur en S de la matière première > 0,12 % ^{**) Des valeurs inférieures de HF et de SO₂ sont possibles, si des matières premières ayant une haute teneur en chaux sont utilisées ^{***)) Lors de l'utilisation de lignite, des teneurs en poussière pouvant aller jusqu'à 700 mg/m³ peuvent être observées}}					

Tableau 3.3 : Données opérationnelles du gaz brut avec divers combustibles

Pour les autres combustibles mentionnés dans la section 2.3.1.5, par exemple, le coke de pétrole, des données d'émission ne sont pas disponibles.

Des COV ne sont pas nécessairement présents dans l'ensemble des effluents gazeux bruts des procédés de cuisson de briques, ils peuvent se produire principalement lorsque des additifs organiques sont utilisés pour développer la porosité. Ces composants organiques dans les effluents gazeux bruts dépendent du degré de porosité et des conditions de fonctionnement dans la zone de préchauffage du four. Souvent, un mélange de différents agents porogènes est employé. Le tableau suivant montre les plages de valeurs de gaz brut obtenues en utilisant divers agents porogènes [4, UBA, 2001].

Composant d'émission	Unité	Polystyrène	Sciure et liants papier
Substances organiques en équivalent C total	mg/m ³	50 - 250	50 - 250
Benzène	mg/m ³	1 - 65	1 - 5
Phénol	mg/m ³	1 - 5	1 - 20
Formaldéhyde	mg/m ³	1 - 20	5 - 100
Aldéhyde (C1 – C4)	mg/m ³	1 - 20	25 - 180
Monoxyde de carbone ^{*)}	mg/m ³	<300	<1500
*) Une valeur élevée de CO indique une combustion incomplète			

Tableau 3.4 : Valeurs de gaz brut avec divers agents porogènes

Les exemples de valeurs de gaz épurés présentées dans le tableau suivant sont des valeurs moyennes dans la fabrication de blocs d'argile poreux et aucune information sur les unités d'épuration de effluents gazeux utilisées n'est disponible. Les plages de données d'utilisation correspondantes peuvent être trouvées dans la section supérieure du tableau. Le tableau présente également la liaison de principe entre les données opérationnelles, les concentrations d'émission et les facteurs d'émission correspondants (émissions se référant à la production d'une brique d'un kilogramme (kg_a)) [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Source d'émission	Four tunnel
Débit volumique d'effluents gazeux (m ³ /h)	5000 – 50000
Température des effluents gazeux (°C)	100 – 200

Composant d'émission	Concentration de gaz épurés moyenne (mg/m ³)	Facteur d'émission, valeur moyenne (mg/kg _B)
Poussières	11,6	17,6
NO _x en équivalent NO ₂	121,0	184,0
SO _x en équivalent SO ₂	26,1	39,6
CO ₂	98200	149000
CO	124,6	189,0
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	2,7	4,1
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	8,4	12,7
Substances organiques en équivalent C total	22,7	34,5

Tableau 3.5 : Concentrations de gaz épurés moyennes (blocs d'argile poreux) et facteurs d'émission correspondants liés au produit

Le tableau 3.6 et le tableau 3.7 présentent des exemples de concentrations d'effluents gazeux des usines de briques fabriquant des blocs d'argile, des usines de briques de parement et des usines de tuiles, mesurées par des experts techniques externes (mesures simples et non continues) et les données opérationnelles correspondantes dans les sections supérieures des tableaux. La plupart des usines utilisent des systèmes d'épuration des effluents gazeux, comme indiqué dans les tableaux, par conséquent, les valeurs représentent des concentrations de gaz épurés [1, BMLFUW, 2003], [17, Burkart, 2004], [2, VITO, 2003].

Paramètre	MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	22000	12400	25300	12440	32930
Température des effluents gazeux (°C)	153	107	224	171	197
Combustible	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Agent porogène	Sciure, polystyrène, papier	Sciure	Sciure, papier	Sciure, cosse de tournesol, lignite	Sciure, polystyrène, papier, lignite
Epuration des effluents gazeux	Post-combustion thermique	-	Post-combustion thermique	Post-combustion thermique	Post-combustion thermique

Composant d'émission	MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5
Poussières	18,0	27,0	4,0	8,4	2,8
SO _x en équivalent SO ₂	26,0	<4,0	178,0	72,2	2,8
Fluorure en équivalent HF	3,0	<0,1	1,5	2,3	1,1
COT sans CH ₄	<5,0	19,0	11,5	11,9	4,0
Acétaldéhyde	-	<1	-	-	-
Benzène	0,18	<0,10	0,18	0,11	0,30
Styrène	0,20	<0,10	0,14	0,03	0,90
Formaldéhyde	0,005	<1,0	2,1	2,5	5,0
Phénol	0,12	<0,10	0,45	0,05	1,60
NO _x en équivalent NO ₂	98	18	113	162	187
Chlorure en équivalent HCl	13,5	<1,0	10,5	7,0	9,9
CO	14	300	-	-	25
MB : usine de briques de maçonnerie ; unités en mg/Nm ³ réf. 18 % de O ₂ , Nm ³ /h _{sec} ou °C					

Paramètre	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9	MB 10
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	15100	20740	15420	27344	18300
Température des effluents gazeux (°C)	131	155	153	102	186
Combustible	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Agent porogène	Sciure, papier, lignite	Papier	Sciure,	Papier, polystyrène	Papier, polystyrène
Epuration des effluents gazeux	-	Post-combustion thermique	-	Filtre à lit de chaux	Post-combustion thermique

Composant d'émission	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9	MB 10
Poussières	1,2	1,9	<1,0	10,7	0,9
SO _x en équivalent SO ₂	17,7	1,2	5,6	1,7	5,0
Fluorure en équivalent HF	0,9	0,1	1,8	<0,1	1,1
COT sans CH ₄	16,5	5,6	97,1	19,0	3,0
Acétaldéhyde	-	-	-	<0,1	-
Benzène	4,7	1,5	3,0	0,4	0,1
Styrène	7,5	1,7	3,0	<0,1	2,0
Formaldéhyde	11,7	4,5	10,6	<0,1	1,3
Phénol	5,6	2,3	6,1	<0,1	0,1
NO _x en équivalent NO ₂	24,2	64,8	43,0	33,6	73,0
Chlorure en équivalent HCl	2,4	1,2	5,0	<0,5	0,5
CO	-	39,2	-	-	44,0
MB : usine de briques de maçonnerie ; unités en mg/Nm ³ réf. 18 % de O ₂ , Nm ³ /h _{sec} ou °C					

Tableau 3.6 : Concentrations de gaz épurés d'usines de briques

Paramètre	KB 1	RT1	RT 2	RT 3/4	RT 5
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	19500	13745	17214	31182	10500
Température des effluents gazeux (°C)	165	84	159	154	202
Combustible	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Epuración des effluents gazeux	Filtre à lit de chaux	Filtre à lit de chaux	Filtre à lit de chaux	Filtre à lit de chaux	Filtre à lit de chaux

Composant d'émission	KB 1	RT 1	RT 2	RT 3/4	RT 5
Poussières	2,2	1,9	1,2	12,5	18,0
SO _x en équivalent SO ₂	6,8	17,1	9,6	<1,6	20,0
Fluorure en équivalent HF	1,4	4,5	<0,5	3,1	4,2
COT sans CH ₄	15,5	1,2	1,2	19,4	8,0
Formaldéhyde	0,2	-	-	-	-
Benzène	2,5	-	-	-	-
Styrène	2,5	-	-	-	-
Phénol	5,0	-	-	-	-
NO _x en équivalent NO ₂	70,0	26,8	38,3	107,3	88,0
Chlorure en équivalent HCl	6,8	1,1	3,3	1,6	14,0
KB : usine de briques de parement ; RT : usine de tuiles ; unités en mg/Nm ³ réf. 18 % de O ₂ , Nm ³ /h _{sec} ou °C					

Tableau 3.7 : Concentrations de gaz épurés d'usines de briques clinker et d'usines de tuiles

Le tableau 3.8 et le tableau 3.9 montrent des exemples récents de fours de fabrication de blocs d'argile et de briques de parement en Belgique et les données opérationnelles correspondantes [30, TWG Ceramics, 2005]. Les usines appliquent différentes mesures comme des mesures intégrées au procédé et des techniques d'épuration des effluents gazeux en bout de chaîne. Les mesures intégrées au procédé comprennent l'ajout de matières premières à faible teneur en soufre, l'ajout de CaCO₃ et l'ajout d'additifs riches en calcium. Par conséquent, les valeurs présentées dans les tableaux sont les valeurs de gaz brut et les valeurs de gaz épuré (après les mesures intégrées au procédé et l'épuration des effluents gazeux).

Paramètre	Blocs d'argile 1	Blocs d'argile 2	Blocs d'argile 3	Blocs d'argile 4
Débit volumique des effluents gazeux	58682 m ³ /h	61027 m ³ /h	51838 m ³ /h	61156 m ³ /h
Température des effluents gazeux	180 – 220 °C	180 – 220 °C	180 – 220 °C	180 – 220 °C
Combustible	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Teneur en soufre dans la matière première-l'argile	0,5 – 0,75 %	> 0,75 %	> 0,75 %	> 0,75 %
Agents porogènes	Sciure	Sciure	Sciure	Sciure
Mesures intégrées au procédé	Matières premières à faible teneur en soufre et contenant du calcium	Matières premières à faible teneur en soufre et contenant du calcium	Matières premières à faible teneur en soufre et contenant du calcium	Matières premières à faible teneur en soufre et contenant du calcium, additifs riches en calcium
Epuración des effluents gazeux	Epuración à sec des effluents gazeux à l'aide du filtre	Adsorbours à lit de type cascade	Adsorbours à lit de type cascade	Adsorbours à lit de type cascade
Adsorbant	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃

Composants d'émission	Blocs d'argile 1			Blocs d'argile 2		
	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %
Poussières	36	3	92	117	71	39
SO _x en équivalent SO ₂	1436	1336	7	2051	1884	8
Fluorure en équivalent HF	25	1	96	56	2	96
Chlorure en équivalent HCl	5	11	0	11	9	18
NO _x	22	21	5	36	31	14
COT	105	77	27	108	71	34
CO	1021	1235	0	988	1038	0

Composants d'émission	Blocs d'argile 3			Blocs d'argile 4		
	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %
Poussières	127	26	80	165	69	58
SO _x en équivalent SO ₂	2883	2295	20	2893	2210	24
Fluorure en équivalent HF	36	3	92	35	6	83
Chlorure en équivalent HCl	7	3	57	9	7	22
NO _x	52	21	60	16	36	0
COT	219	106	52	51	86	0
CO	936	905	3	1137	1165	0

Tableau 3.8 : Valeurs d'émission de gaz bruts et de gaz épurés dans la fabrication de blocs d'argile

Paramètre	Brique de parement 1	Brique de parement 2	Brique de parement 3	Brique de parement 4
Débit volumique des effluents gazeux	56830 m ³ /h	16319 m ³ /h	35000 m ³ /h	22915 m ³ /h
Température des effluents gazeux	230 °C	150 °C	110 °C	124 °C
Combustible	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Teneur en soufre de la matière première argileuse	0,5 – 0,75 %	<0,25 %	<0,25 %	<0,25 %
Epuration du effluents gazeux	Epuration à sec des effluents gazeux à l'aide du filtre	Adsorbants à lit de type cascade	Adsorbants à lit de type cascade	Adsorbants à lit de type cascade
Adsorbant	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃

Composants d'émission	Brique de parement 1			Brique de parement 2		
	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %
Poussières	9	14	0	19	12	37
SO _x en équivalent SO ₂	967	635	34	141	163	0
Fluorure en équivalent HF	21	1	95	23	6	74
Chlorure en équivalent HCl	6	1	83	3	3	0
NO _x	18	19	0	49	67	0
COT	6	4	33	6	15	0
CO	110	129	0	177	135	24

Composants d'émission	Brique de parement 3			Brique de parement 4		
	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %	Valeur du gaz brut mg/Nm ³	Valeurs du gaz épuré mg/Nm ³	Efficacité de réduction %
Poussières	30	5	83	8	4	44
SO _x en équivalent SO ₂	150	36	76	27	10	63
Fluorure en équivalent HF	60	0,5	99	12	0,1	99
Chlorure en équivalent HCl	10	0,6	94	5	0,4	92,5
NO _x	100	64		110	98	11
COT				4,1	4	2,4
CO	150	97		90,5	54	40,3

Tableau 3.9 : Valeurs d'émission de gaz bruts et de gaz épurés dans la fabrication de briques de parement

Les émissions dans l'air ne se produisent pas uniquement pendant le procédé de cuisson, mais également pendant ces autres étapes du procédé de fabrication [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] :

- pendant le stockage et le transport interne de matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- des émissions de poussière résultent du procédé de préparation à sec de masses de clinker
- des émissions de poussière résultent du procédé de façonnage de masses sèches (pressage)
- des émissions de poussière peuvent résulter des procédés d'émaillage et d'engobage, en fonction de la technique d'émaillage ou d'engobage utilisée
- certains produits de briques tels que les briques calibrées sont meulés après le procédé de cuisson. Par conséquent, de la poussière peut également résulter des procédés de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

Des eaux de process sont produites en petites quantités dans la fabrication de briques et de tuiles sous la forme d'eau de nettoyage, si un traitement de surface tel qu'un émaillage ou un engobage est effectué. Les émaux et engobes résiduels sont collectés et réintroduits dans le cycle de production. Des quantités supplémentaires d'eaux de process peuvent résulter des opérations de nettoyage des unités de préparation de matières premières et des moules. En outre, cette eau est souvent réutilisée dans des circuits fermés [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]. Des données concernant des émissions dans l'eau ne sont pas disponibles.

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (nettoyage d'unités) en petites quantités seulement et également des opérations de nettoyage de moules et des unités d'émaillage ou d'engobage
- des moules de plâtre sont usagés et cassés dans le procédé de fabrication de tuiles
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration de gaz
- des résidus solides, par exemple, des cendres, résultent de la cuisson de combustibles solides.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont expédiées hors de l'usine pour servir à d'autres industries ou sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

3.3.1.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

La fabrication de briques et de tuiles d'argile est une forte consommatrice d'énergie, étant donné qu'elles sont fabriquées par un procédé à haute température pour convertir la matière première en une matière ayant des propriétés totalement différentes, l'argile cuite. En fonction du type du produit, la part des coûts énergétiques dans les coûts de production globaux varie généralement entre 17 et 30 % avec des valeurs maximales pouvant atteindre 40 %. Le gaz naturel est principalement utilisé aujourd'hui comme source d'énergie pour la cuisson au four et représente à peu près 90 % de la consommation d'énergie totale, mais du gaz de pétrole liquéfié, du gasoil, du charbon, du coke de pétrole, de la tourbe et l'électricité servent également de sources d'énergie dans certains cas [13, SYKE, 2004], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Le besoin principal en énergie au sein de l'industrie concerne le procédé de transformation de l'argile en une forme durable adaptée à tous les types de construction. La consommation d'énergie dépend de la matière première, du procédé de fabrication et du type de produit, en plus du type de techniques de cuisson employées. Bien qu'un procédé de cuisson particulier puisse être plus économe en énergie, il peut ne pas être adapté au produit spécifique.

De fortes variations sont notées dans la consommation d'énergie spécifique au sein de l'Europe, en fonction des différents types de construction et de produit utilisés. Chaque type de produit a un modèle de consommation d'énergie spécifique lié au procédé de cuisson (par exemple, température de cuisson, temps d'imprégnation et densité d'enfournement).

En Autriche, Allemagne et Italie, où la plupart des maisons sont construites avec des blocs légers, l'énergie utilisée est faible, à savoir, de 1,1 – 1,9 GJ/tonne. La plus faible densité des blocs est obtenue grâce à la présence et/ou l'ajout de matières porogènes à l'argile. Ces matières sont pour la plupart des substances organiques. Elles contribuent à l'équilibre énergétique de la production de briques d'argile et, par conséquent, la consommation d'énergie principale spécifique (gaz naturel, combustible liquide) est faible.

Dans le nord de l'Europe en particulier, un nombre élevé de briques de parement sont utilisées comme couche externe. Ces briques ont généralement une densité plus élevée et sont souvent cuites à une température plus élevée que les blocs légers. En conséquence, la consommation d'énergie spécifique pour la production de briques est plus élevée, à savoir, de 2,5 – 2,7 GJ/tonne.

L'importante variation rencontrée au Royaume-Uni (1,4 – 2,4 GJ/t) est due à la quantité de la matière organique dans l'argile utilisée pour la fabrication de briques (une grande quantité dans l'argile d'Oxford inférieur pour les briques Fletton et une faible quantité pour les briques non Fletton) [3, CERAME-UNIE, 2003].

Le tableau 3.10 et le tableau 3.11 montrent des exemples de données de consommation de gaz naturel et d'énergie électrique provenant des installations de fabrication de briques et de tuiles en Autriche et de données de consommation d'énergie provenant d'Espagne, ainsi que de la consommation d'énergie spécifique générale de l'industrie des briques et des tuiles [1, BMLFUW, 2003], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Source d'énergie/consommation	Unité	Briques de maçonnerie	Briques de parement	Tuiles
Gaz naturel (AT)	GJ/t	1,02 – 1,87	2,87	1,97 – 2,93
Energie électrique (AT)	GJ/t	0,08 – 0,22	0,27	0,23 – 0,41
Consommation d'énergie (ES)	GJ/t	1,50 – 2,50	2,50 – 3,00	1,90 – 2,95

Tableau 3.10 : Données de consommation d'énergie par tonne de produit provenant des installations de fabrication de briques et de tuiles

Pays	Unité	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Autriche	GJ/t	2,38	2,09	1,17	1,72	1,63	1,69
Belgique	GJ/t	3,3	3,19	2,16	2,45	2,59	2,21
Allemagne	GJ/t	2,43	2,31	1,93	1,63	2,57	2,31
Danemark	GJ/t	2,73	-	2,41	2,67	2,61	2,65
Espagne	GJ/t	2,38	2,30	2,24	2,18	2,28	2,26
France	GJ/t	2,87	2,62	2,77	2,62	2,80	2,61
Italie	GJ/t	2,80	2,60	2,09	1,90	1,94	2,00
Pays-Bas	GJ/t	3,63	2,93	2,19	2,70	3,05	3,35
Royaume-Uni	GJ/t	2,29	2,16	2,48	2,63	3,25	2,85
Suisse	GJ/t	-	2,56	2,62	2,53	2,44	-

Tableau 3.11 : Consommation d'énergie spécifique dans l'industrie des briques et des tuiles

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.2 et le tableau 2.4.

Consommation d'eau et de matières premières

Des exemples de données de consommation d'eau et de matières premières d'une usine de fabrication de briques de maçonnerie sont présentés sur la figure suivante sous la forme d'un schéma de débit massique [1, BMLFUW, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

Clay	Argile
Loam	Terre
35 Parts (27,6 %)	35 Parts (27,6 %)
85 Parts (67,0 %)	85 Parts (67,0 %)
Water	Eau
5 Parts (3,8 %)	5 Parts (3,8 %)
2 Parts (1,6 %)	2 Parts (1,6 %)
Open storage	Entrepôt ouvert
Preparation : Dosing, Crushing, Homogenisation	Préparation : dosage, broyage, homogénéisation
Shaping	Façonnage
Recycled process losses	Déchets de production recyclés
Broken ware	Déchets de casse
Drying	Séchage
Firing	Cuisson
Sorting	Tri
Packaging	Emballage
Shipping	Transport
<u>H₂O</u> 17 Parts (13,4 %)	<u>H₂O</u> 17 Parts (13,4 %)
<u>Loss during firing</u> 8 Parts (6,3 %)	<u>Perte pendant la cuisson</u> 8 Parts (6,3 %)
<u>Broken ware</u> 2 Parts (1,6 %)	<u>Déchets de casse</u> 2 Parts (1,6 %)
<u>End product</u> 100 Parts (78,7 %)	<u>Produit final</u> 100 Parts (78,7 %)
= <u>127 Parts</u>	= <u>127 Parts</u>

Figure 3.4 : Exemple de débit massique pour la fabrication de briques de maçonnerie

3.3.2 Tuyaux en grès

3.3.2.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent dans la fabrication de tuyaux en grès. Dans cette section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson de tuyaux en grès. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Des émissions importantes dans l'air lors de la fabrication de tuyaux en grès résultent du procédé de cuisson.

Le tableau suivant présente les valeurs de gaz épuré maximales émises par les usines de tuyaux en grès européennes (sauf pour le RU) et les données opérationnelles du four tunnel correspondant (dans la section supérieure du tableau) [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001].

Source d'émission	Four tunnel
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	4000 - 18000
Température des effluents gazeux (°C)	160 – 200

Composant d'émission	Concentration de gaz épuré maximale (mg/m ³)
Poussières	30
NO _x en équivalent NO ₂	200
SO _x en équivalent SO ₂	200
CO	200
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	5
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	30

Tableau 3.12 : Concentration maximale de gaz épurés dans la fabrication de tuyaux en grès

Au RU, des concentrations de fluorure maximales allant jusqu'à 10 mg/m³ sont observées en raison de l'existence d'une valeur limite d'émission plus élevée, égale à 10.

Les émissions dans l'air ne se produisent pas uniquement pendant le procédé de cuisson, mais également pendant ces autres étapes du procédé de fabrication [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] :

- pendant le stockage et le transport interne des matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- dans certaines circonstances, des émissions gazeuses peuvent résulter du procédé de séchage. Si un excédent de chaleur du four est employé dans le procédé de séchage des produits crus, qui comprend les effluents gazeux provenant de la zone de cuisson et en l'absence de systèmes de chauffage fermés, des émissions de fluorure peuvent se produire
- si un émaillage est effectué par pulvérisation, des émissions de poussière peuvent se produire à partir de cette étape de procédé
- certains produits de tuyaux en grès sont meulés après le procédé de cuisson. Par conséquent, de la poussière peut également résulter des procédés de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication de tuyaux en grès, des eaux de process sont produites pendant le nettoyage des unités de préparation de matières premières et des unités d'émaillage, ainsi qu'à partir d'un meulage humide. L'eau est souvent réutilisée en circuit fermé. Les excédents d'email sont collectés et réintroduits dans le cycle de production [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005]. Les données concernant des émissions dans l'eau ne sont pas disponibles.

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (nettoyage d'unités), du nettoyage des unités d'émaillage et également du meulage humide
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et des ferrailles, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration d'effluents gazeux

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets.[4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TGW Ceramics, 2005]

3.3.2.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

La consommation d'énergie spécifique dans la fabrication de tuyaux en grès est décrite dans le tableau suivant. Une distinction est faite entre la consommation d'énergie spécifique pour la fourniture de la matière première minérale et de l'énergie, et pour la fabrication des tuyaux. Les matières minérales sont l'argile, les agents porogènes et l'émail, et la source d'énergie est le gaz naturel. La consommation d'électricité, en ce qui concerne l'énergie primaire, comprend le procédé complet de fabrication y compris les installations secondaires, l'éclairage etc. Les données utilisées sont valides pour environ 90 % de la production allemande. Les niveaux de consommation pour les petits tuyaux en grès (DN 100/ DN 150), les tuyaux en grès de taille moyenne (DN 200/DN 300) et les grands tuyaux en grès (DN 500) sont présentés séparément [4, UBA, 2001].

	DN 100, DN 150 (MJ/kg)	DN 200, DN 300 (MJ/kg)	DN 500, fixations (MJ/kg)
Alimentation			
Matières premières minérales	0,20	0,20	0,20
Gaz naturel	0,41	0,49	0,56
Production			
Préparation	0,10	0,10	0,10
Séchage	1,22	1,44	1,66
Cuisson	3,06	3,60	4,14
Electricité	1,20	1,20	1,20
TOTAL	6,19	7,03	7,86

Tableau 3.13 : Consommation d'énergie spécifique dans la fabrication de tuyaux en grès

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.7.

Consommation d'eau et de matières premières

Des exemples de données de consommation d'eau et de matières premières pour la fabrication de tuyaux en grès sont présentés sur la figure suivante sous la forme d'un schéma de débit massique [4, UBA, 2001].

Glaze	Email
Clay	Argile
Chamottes	Chamottes
Water	Eau
Preparing and shaping	Préparation et façonnage
Broken ware	Déchets de casse
Circuit material	Matière recirculée
40 – 50 m ³ natural gas	40 – 50 m ³ de gaz naturel
DN 100 – DN 500	DN 100 – DN 500
Air	Air
Drying	Séchage
Flue-gas	Effluents gazeux
Glazing	Emaillage
Process waste water	Eaux de process
100 – 130 m ³ natural gas	100 – 130 m ³ de gaz naturel
Firing	Cuisson
1000 kg vitrified clay pipes	1000 kg de tuyaux en grès

Figure 3.5 : Exemple de débit massique pour la fabrication de tuyaux en grès

3.3.3 Produits réfractaires

3.3.3.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent lors de la fabrication des produits réfractaires. Dans cette section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson de produits réfractaires. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Des émissions importantes dans l'air lors de la fabrication de produits réfractaires résultent du procédé de cuisson.

Le tableau suivant montre des plages de données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les valeurs de gaz brut correspondantes dans les procédés de cuisson dans des fours tunnels utilisés pour la cuisson de différents produits réfractaires [4, UBA, 2001].

Source d'émission	Four tunnel		
Produit	Magnésite	Haute teneur en alumine	Silice
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	15000 - 25000	9000 – 17000	8000 – 12000
Température des effluents gazeux (°C)	250 - 400	120 – 250	150 - 250

Composant d'émission	Concentration (mg/m ³)		
Produit	Magnésite	Haute teneur en alumine	Silice
Poussières	8 - 35	5 - 80	10 - 25
NO _x en équivalent NO ₂	110 - 470	30 - 250	5 – 100
SO _x en équivalent SO ₂	90 - 580	10 - 430	20 – 150
CO	12 - 180	30 - 150	10 – 50
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	0,5 – 1,5	5 - 50	1 - 3

Tableau 3.14 : Valeurs de gaz bruts de différents produits réfractaires

Le tableau suivant montre des plages d'émissions provenant de fours pour des produits réfractaires non basiques [3, CERAME-UNIE, 2003].

Composant d'émission	mg/m ³
Poussières	44 – 113
SO ₂	260 – 490
NO _x	25 – 200
Fluorure, HF	0,4 – 2,5
CO ₂	1 – 3 vol- %

Tableau 3.15 : Emissions provenant de fours pour des produits réfractaires non basiques

Dans des procédures spéciales (formation de liaisons de carbone, imprégnation de brai), des produits de décomposition spécifiques (ammoniac, formaldéhyde, phénol etc.) sont formés en fonction des agents liants spéciaux (goudron de houille, brai, résine). Des exemples de valeurs de gaz brut pour des procédures spéciales sont présentées dans le tableau suivant [4, UBA, 2001].

Composant d'émission (mg/m ³)	Chambre de durcissement	Four de revenu		Revêtement de brai
	Liaison par la résine ^{*)}	Liaison par la résine ^{*)}	Liaison au brai ^{**)}	Liaison au brai ^{**)}
Ammoniac	2500	20	-	-
Formaldéhyde	25	10	-	-
Phénol	350	80	-	-
Substances organiques en équivalent C total	>3000	1000	2500	1500
^{*)} Résol phénolique				
^{**)} Les valeurs pour le C total comprennent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)				

Tableau 3.16 : Valeurs de gaz bruts pour des procédures spéciales

Les émissions dans l'air ne se produisent pas uniquement pendant le procédé de cuisson, mais également pendant ces autres étapes du procédé de fabrication [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] :

- pendant le stockage et le transport interne de matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- des émissions de poussière résultent du procédé de préparation à sec de matières premières
- des émissions de poussière et également des vapeurs provenant des agents liants et additifs se produisent pendant le façonnage dans les presses
- dans certaines circonstances, des émissions gazeuses peuvent résulter du procédé de séchage. Si un excédent de chaleur du four est employé dans le procédé de séchage des produits crus, qui comprend les effluents gazeux provenant de la zone de cuisson, et en l'absence de systèmes de chauffage fermés, des émissions de polluants atmosphériques organiques et inorganiques peuvent se produire
- certains produits réfractaires sont meulés après le procédé de cuisson. Par conséquent, de la poussière peut également résulter des procédés de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication de produits réfractaires, les eaux de process sont produites pendant le nettoyage des unités de préparation de matières premières et des unités de moulage, ainsi qu'à partir d'un meulage humide. L'eau est souvent réutilisée en circuit fermé [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]. Des données concernant les émissions dans l'eau ne sont pas disponibles.

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (nettoyage d'unités), du nettoyage des unités de moulage et également du meulage humide
- des moules en plâtre usagés et cassés peuvent résulter du procédé de coulage en barbotine
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration des effluents gazeux.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

3.3.3.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

Le tableau suivant montre les plages de données de consommation d'énergie spécifiques pour les différentes étapes dans la fabrication de briques réfractaires de magnésite [1, BMLFUW, 2003], [17, Burkart, 2004].

Procédé	MJ/kg
Préparation, criblage	0,35 – 0,50
Pesage, dosage, mélange	0,045 – 0,070
Façonnage	0,13 – 0,20
Séchage, cuisson	3,0 – 6,3
Traitement ultérieur, emballage	0,08

Tableau 3.17 : Données de consommation d'énergie pour la fabrication de briques réfractaires de magnésite par kg de produit

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.9, le tableau 2.10, le tableau 2.11 et le tableau 2.12.

Consommation d'eau et de matières premières

Des exemples de données de consommation d'eau et de matières premières pour la fabrication de produits réfractaires sont présentés sur la figure suivante sous la forme d'un schéma de débit massique spécifique à la fabrication de briques en périclase-chromite [4, UBA, 2001].

Chromium ore	Minerai de chrome
Sintered magnesite	Magnésite frittée
Sulphite liquor	Sulfites en solution
Water	Eau
Preparation	Préparation
Broken ware	Déchets de casse
Pressing	Pressage
Green broken ware	Produits crus cassés
Natural gas	Gaz naturel
Drying	Séchage
Flue-gas	Effluents gazeux
Dried broken ware	Déchets de casse séchés
Fired broken ware	Déchets de casse cuits
Air	Air
Firing	Cuisson
Periclase chromite bricks	Briques en périclase-chromite

Figure 3.6 : Exemple de débit massique pour la fabrication de briques en périclase-chromite

3.3.4 Granulats d'argile expansée

3.3.4.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent dans la fabrication de granulats d'argile expansée. Dans cette section, des plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour les étapes de procédé de concassage primaire, meulage à sec, granulation, cuisson, criblage et traitement de sable. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Des émissions importantes dans l'air lors de la fabrication de granulats d'argile expansée résultent du stockage, du transport des matières premières, du concassage primaire et du meulage à sec de l'argile brute, de la granulation, pendant le procédé de cuisson (expansion réelle) et également, lors du criblage et du traitement de sable. Lorsqu'elles proviennent du stockage et de la manipulation de matières premières, d'un stock de granulats légers (LWA), ainsi que du trafic de véhicules sur site, les émissions sont principalement d'une nature diffuse.

Stockage et transport de matières premières :

Pendant le stockage et le transport de matières premières, des émissions de poussière se produisent au niveau des points de transfert dans les systèmes de convoyage et de stockage, en fonction des caractéristiques des matières premières.

Concassage primaire :

L'opération de concassage primaire, qui est appliquée dans la technique pour les types d'argiles plutôt sèches (procédé par voie semi-humide), conduit à des émissions de poussière. Le tableau suivant montre les plages de valeurs d'émission de poussières résultant du concassage primaire en aval d'un filtre à manches [4, UBA, 2001].

Concassage primaire	Valeurs
Poussières	0,7 – 3,4 mg/m ³ ¹⁾
¹⁾ sur la base des effluents gazeux secs (273 K, 1013 hPa)	

Tableau 3.18 : Plages de valeurs d'émission de poussières provenant du concassage primaire en aval d'un séparateur à couche filtrante

Meulage à sec :

Pendant le procédé de meulage à sec, qui est appliqué dans la technique pour les types d'argiles plutôt sèches, des dioxydes de soufre et des oxydes d'azote provenant de la combustion de fioul lourd sont générés en plus de la poussière. Le tableau suivant montre les plages de valeurs d'émissions réelles, issues du meulage à sec en aval des différents systèmes de filtration [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Poussières en aval de l'électrofiltre ou d'un filtre à manches	6 – 50 mg/m ³ ^{1) 2)}
Dioxyde de soufre	0,02 – 0,20 g/m ³ ¹⁾
Oxydes d'azote, en équivalent NO ₂	0,11 – 0,14 g/m ³ ¹⁾
¹⁾ sur la base des effluents gazeux humides et de 17 % par volume de O ₂ (273 K, 1013 hPa)	
²⁾ Valeurs moyennes annuelles	

Tableau 3.19 : Plages de valeurs d'émission réelles provenant du meulage à sec en aval des différents systèmes de filtration

Granulation :

La granulation, qui est appliquée dans la technique pour les types d'argiles plutôt sèches, conduit à des émissions de poussière. Le tableau suivant présente les plages de valeurs d'émissions de poussières, issues de la granulation en aval d'un filtre à manches [26, UBA, 2005].

Granulation	Valeurs
Poussières	5 – 15 mg/m ³ ¹⁾
¹⁾ sur la base des effluents gazeux secs (273 K, 1013 hPa)	

Tableau 3.20 : Plages de valeurs d'émission de poussières provenant de la granulation en aval d'un filtre à manches

Procédé de cuisson :

La technologie de traitement et les combustibles utilisés dans la fabrication de granulats d'argile expansée n'ont qu'une influence limitée sur la situation des émissions dans une usine. Le paramètre principal est la qualité des matières premières. Les émissions organiques relatives aux matières premières et de dioxyde de soufre (provenant d'ordinaire de la pyrite et de la marcasite) dans le gaz brut font partie du procédé de dilatation effective.

Le tableau suivant montre les plages de valeurs d'émissions issues des procédés de cuisson et de séchage, en aval des différents systèmes de filtration (électrofiltre et épuration des effluents gazeux par voie humide) [26, UBA, 2005] [28, Schrocht, 2005] [30, TWG Ceramics, 2005] :

Paramètre	Unité	Valeur d'émission
Poussières	mg/m ³	9 - 200
SO ₂	mg/m ³	200 – 2000
NO _x	mg/m ³	120 – 930
HCl	mg/m ³	2,7 – 250
HF	mg/m ³	0,4 – 20
CO	mg/m ³	50 – 2600
COT	mg/m ³	10 – 800
Dioxines	ng/m ³	<0,1
Données attribuées au niveau de O ₂ normal de 13 – 16 % en vol. Mesures limitées uniquement pour les composants autres que les poussières et le SO ₂		

Tableau 3.21 : Plages de valeurs d'émission issues des procédés de cuisson en aval des différents systèmes de filtration

Un autre exemple d'ensemble de données de valeurs d'effluents gazeux issus d'un procédé de cuisson de granulats d'argile expansée dans un four rotatif (technique de Leca), qui est équipé d'un électrofiltre à des fins de dépoussiérage, est reporté comme suit [17, Burkart, 2004] :

- poussières : moins de 50 mg/m³
- SO_x : 1700 – 1800 mg/m³ (teneur en soufre dans la matière première principale supérieure à 0,75 %)
- fluorure, en équivalent HF : inférieur à 5 mg/m³.

Criblage et traitement de sable :

Des émissions de poussières se produisent pendant le criblage des différents groupes de tailles de particules et pendant le traitement de sable. Le tableau suivant montre une plage de valeurs d'émission de poussières d'unités de criblage [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Paramètre	Unité de criblage I (avec broyeur à sable)
Poussières	4,3 – 50,0 mg/m ³

Tableau 3.22 : Valeurs d'émission de poussières d'unités de criblage

Emissions dans l'eau

Des laveurs humides sont aujourd'hui utilisés dans certaines installations. Le tableau suivant montre des valeurs sur l'effluent sous forme de moyennes hebdomadaires [30, Ceramics, 2005].

Paramètre	Valeurs
pH	6 – 9
Matières en suspension	≤ 50 mg/l

Tableau 3.23 : Valeurs d'effluents de laveurs humides

De l'eau est principalement utilisée dans la préparation (et le façonnage) des matières premières.

Les émissions dans l'eau ne sont pas pertinentes, car aucune eau de process n'est générée dans la fabrication d'argile expansée. L'eau de refroidissement pour les systèmes de four passe à travers un séparateur d'huile et est renvoyée au circuit de refroidissement. L'ensemble de l'eau de traitement est évaporé dans le procédé de séchage.

Déchets de production

Aucun déchet de production n'est généré dans la fabrication d'argile expansée. Les particules tamisées surdimensionnées et sous-dimensionnées sont renvoyées aux broyeurs à sable. L'ensemble de la poussière qui est collectée est réintroduit dans le procédé de fabrication. Le gypse généré pendant l'épuration des effluents gazeux est utilisé dans l'industrie du ciment en tant que régulateur de durcissement.

3.3.4.2 Données de consommationConsommation d'énergie

La consommation d'énergie pour le meulage à sec, qui est appliqué dans le traitement des types d'argiles plutôt sèches (procédé par voie semi-humide) est d'environ 217 MJ/m^3 . Ceci correspond à environ 20 % de la consommation d'énergie thermique totale pour l'ensemble du procédé de fabrication de types d'argiles plutôt sèches (dans le procédé de fabrication pour argile avec une teneur en humidité élevée, le meulage à sec n'est pas effectué). La consommation d'énergie électrique pour le meulage à sec est d'environ $26,3 \text{ MJ/m}^3$.

La consommation d'énergie pour le procédé de cuisson est d'environ $900 - 1300 \text{ MJ/m}^3$, en fonction de la matière première (teneur en humidité de l'argile), de la technologie de production et de la capacité de production [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

La consommation d'énergie électrique spécifique globale est comprise entre 41 et 83 MJ/m^3 , en fonction de la masse en vrac, des propriétés des matières premières et de la technologie de production (préparation de l'argile, technologie de traitement thermique) [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Consommation d'eau et de matières premières

Le tableau suivant donne un exemple d'utilisation de mélange de matières premières dans la production de granulats d'argile expansée [30, TWG Ceramics, 2005].

Matériau	Quantité % en poids	Usage
Argile (sèche)	> 90	Matière première
Oxyde de fer	0 – 8	Fondant
Carbonate de chaux/poudre de dolomite	0,5 – 3	Agent de démoulage
Porteur de carbone	0 - 1	Agent d'expansion

Tableau 3.24 : Mélange de matières premières dans la production de granulats d'argile expansée

3.3.5 Carreaux pour sols et murs

3.3.5.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent dans la fabrication de carreaux pour sols et murs. Dans la présente section, des plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour les étapes de procédé principales. Les émissions dans l'air issues d'autres étapes de procédé, les émissions dans l'eau et les déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Des émissions importantes dans l'air lors du broyage de matières premières comprennent principalement des particules issues de matières premières telles que l'argile, le quartz et le feldspath. Dans le meulage à sec, le débit des émissions est d'environ 6 Nm³ d'air par kilogramme de matière première (MP) traitée et le facteur d'émissions de particules (poussières) est de 50 g/kg MP. Dans le meulage humide, le débit des émissions est également d'environ 6 Nm³ air/kg MP avec un facteur d'émissions d'environ 15 g poussières/kg MP. Ces facteurs d'émissions se réfèrent aux flux d'effluents gazeux non épurés.

De la poussière, de l'oxyde d'azote, des oxydes de soufre, du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone sont émis sous la forme d'émissions de polluants atmosphériques dans le procédé de production de granulats de pressage. Des opérations d'épuration dans la section d'émaillage créent des suspensions aqueuses qui contiennent des matières céramiques. Ces suspensions sont ajoutées aux barbotines en cours de séchage. Dans les émissions produites à partir des barbotines en cours de séchage, il faut prendre en compte des éléments tels le bore, le chlore et le plomb. La capacité d'évaporation de séchoirs à atomisation va jusqu'à 20000 l/h. Le tableau suivant montre des plages types de données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les valeurs de gaz brut correspondantes d'émissions importantes, se produisant lors du séchage par atomisation de la barbotine [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005].

Source d'émission	Séchoir à atomisation
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	30000 - 200000
Température des effluents gazeux (°C)	60 – 130
Humidité (m ³ _{eau} /m ³ _{total})	0,13 – 0,20
Oxygène (%)	16 - 20

Composant d'émission	Concentration (mg/m ³)
Poussières	150 – 1500
NO _x en équivalent NO ₂	5 – 300
CO	2 – 50
Composés chlorés en équivalent HCl	1 – 5
Bore	< 0,3
Plomb	< 0,15
CO ₂	1,5 – 4,0 % en vol

Tableau 3.25 : Données opérationnelles et valeurs du gaz brut d'unités de séchage par atomisation

L'utilisation d'installations de séchage par atomisation avec des unités de cogénération est possible et convenable du point de vue de la consommation d'énergie, mais les effluents gazeux bruts provenant de ces unités contiennent généralement davantage de NO_x (plage comprise entre 50 et 800 mg/m³, en équivalent NO₂) [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Dans le façonnage de pièces par pressage, le débit d'émissions est d'environ 5 Nm³ d'air/kg PM et le facteur d'émissions est d'environ 7 g de poussières/kg MP, par rapport aux effluents gazeux non épurés. En fonction de la taille de la presse, les flux d'effluents gazeux sont compris entre 2000 et 4000 m³/h à des températures comprises entre 20 et 30°C. Des émissions de poussières supplémentaires se produisent dans les unités de polissage après la presse. Dans les processus

d'extrusion, seules des masses humides sont traitées, de sorte qu'aucune émission de poussière ne peut se produire.

Le tableau suivant montre les plages de données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les plages d'émissions correspondantes dans les effluents gazeux non épurés sortant des séchoirs (les données correspondent aux séchoirs verticaux et horizontaux). [3, CERAME-UNIE, 2003], [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005], [21, Almeida, 2004].

Source d'émission	Séchoir
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	2000 – 7000
Température des effluents gazeux (°C)	50 – 190
Humidité (m ³ _{eau} /m ³ _{total})	0,04 – 0,11
Oxygène (%)	16 – 20

Composant d'émission	Concentration
Poussières	5 – 25 mg/m ³
CO ₂	1 – 3 % en vol

Tableau 3.26 : Données opérationnelles et valeurs du gaz brut de séchoirs

Les particules présentes dans les émissions de séchoir résultent des particules de poussière fixées à la pâte et de la poussière provenant de la rupture des carreaux dans les séchoirs qui dérivent avec les effluents gazeux. Les températures relativement faibles dans ces installations, généralement inférieures à 300°C, empêchent la formation d'oxydes d'azote dans ce procédé.

Des émissions gazeuses et particulaires se produisant lors de l'émaillage dépendent de la technique d'application et de la composition de l'émail. En général, des émissions gazeuses peuvent se produire dans le procédé de pulvérisation et dans le procédé de préparation de l'émail. Les caractéristiques physico-chimiques de ces émissions sont hautement variables du fait de la forte diversité des émaux utilisés. La poussière produite lors de l'émaillage et de la préparation de l'émail est caractérisée par la présence de silice, bore, zirconium, sodium, plomb, lithium, potassium, baryum, calcium, magnésium, zinc et aluminium. Le débit d'émission est d'environ 5 Nm³ air/kg d'émail traité et le facteur d'émission est d'environ 0,5 g de poussières/kg d'émail traité, en rapport avec les effluents gazeux non épurés. Le flux d'effluents gazeux peut atteindre 7000 m³/h à une température d'environ 30°C.

Le tableau suivant présente des plages de données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les plages correspondantes de valeurs de gaz brut de fours à rouleaux [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005], [21, Almeida, 2004].

Source d'émission	Four à rouleaux
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	5000 – 15000
Température des effluents gazeux (°C)	130 – 300
Humidité (m ³ _{eau} /m ³ _{total})	0,05 – 0,1

Composant d'émission	Concentration (mg/m ³)
Poussières	5 – 30
NO _x en équivalent NO ₂	5 – 150
SO _x en équivalent SO ₂	1 – 300
CO	1 – 15
Composés fluorés en équivalent HF	5 – 60
Composés chlorés en équivalent HCl	20 – 150
Bore	< 0,5
Plomb	< 0,15
CO ₂	1,5 – 4,0 % en vol

Tableau 3.27 : Données opérationnelles et valeurs du gaz brut de cuisson

Une concentration de fluor dans l'argile comprise entre 500 et 800 mg/kg conduit à des émissions de fluor mentionnées ci-dessus. Dans le procédé de cuisson, le bore présent dans l'émission provient de l'utilisation de l'émail qui contient des composés de bore. Le bore et le chlore présents dans les émissions peuvent provenir de l'eau dans les carrelages (le bore ne provient que de l'eau recyclée et le chlore peut également provenir de l'eau pure d'alimentation publique), qui s'évapore ensuite dans les premières étapes de cuisson. La concentration en plomb est relativement faible et provient en principe de la vaporisation d'un groupe mineur d'émaux contenant cet élément [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Le tableau suivant, qui est représentatif de la situation italienne, présente une comparaison entre les facteurs d'émission de polluants pour les émissions contrôlées (valeurs de gaz épuré) et les facteurs d'émission de polluants correspondants pour les émissions incontrôlées (à savoir, en amont des installations de contrôle de pollution) pour les diverses étapes (phases) de fabrication de carreaux pour sols et murs. Les facteurs d'émission se réfèrent à l'unité de production de la phase correspondante [6, Timellini, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005];

Emissions gazeuses issues de		Débit spécifique (Nm³/kg)	Facteurs d'émissions de polluants PEF (g/kg)					
Phase	Opération		Poussières (particules)		Composés de plomb (Pb)		Composés fluorés (HF)	
			NC	C	NC	C	NC	C
Préparation de la pâte	Meulage à sec	6	40 - 60	0,05 – 0,1				
	Meulage humide	6	10 - 20	0,02 – 0,1				
	Séchage par atomisation	5	5 – 10	0,1 – 0,2				
Façonnage	Pressage	5	5 - 10	0,01 – 0,05				
Préparation et application de l'émail		5	0,5 – 1,0	0,02 – 0,03				
Cuisson		3 - 6	0,1 – 0,5	0,01 – 0,02	0 – 0,1	0,001 – 0,01	0,1 – 0,5	0,01 – 0,05
NC = Emission non contrôlée ; C = Emission contrôlée								

NC = Emission non contrôlée ; C = Emission contrôlée

Tableau 3.28 : Emissions gazeuses issues des différentes phases des procédés de fabrication de carreaux pour sols et murs. Facteurs d'émission de polluants pour émissions non-contrôlées (NC) et contrôlées (C)

Les émissions dans l'air sous forme de poussières peuvent se produire pendant le stockage et le transport interne de matières premières, où des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention. Les carreaux pour sols et murs sont souvent meulés après le procédé de cuisson. Par conséquent, de la poussière peut également résulter des procédés de meulage à sec [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication des carreaux pour sols et murs, des eaux de process sont produites pendant le nettoyage des unités de préparation de matières premières et des unités d'émaillage, ainsi qu'à partir du procédé d'élimination de l'eau avec des filtres-presses et des filtres centrifuges et à partir d'un meulage humide. L'eau est souvent réutilisée en circuit fermé. Les excès d'émail sont collectés et réintroduits dans le cycle de production [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

Le tableau suivant donne des détails sur une composition standard des eaux de process non traitées issues des installations de fabrication de carreaux pour sols et murs. L'eau est principalement de l'eau de nettoyage provenant des unités d'émaillage, de sorte que la concentration de substances dépend dans une grande mesure de la composition de l'émail [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998].

Paramètre	Plage (mg/l)	Paramètre	Plage (mg/l)
pH	7 – 9	Calcium	5 – 500
Matière en suspension	1000 – 20000	Bore	1 – 60
Matière décantable	5 – 30	Plomb	< 5
DCO	100 – 400	Sodium	50 – 500
DBO ₅	40 – 60	Potassium	1 – 50
Fluorures	< 2	Silicium	5 – 30
Chlorures	300 – 700	Aluminium	< 2
Sulfates	100 – 1000	Fer	< 0,5
Magnésium	10 – 100	Zinc	< 2

Tableau 3.29 : Analyse chimique des eaux de process non traitées

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (en particulier, du nettoyage des unités), du nettoyage des unités d'émaillage et également du meulage humide
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration des effluents gazeux.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

La quantité et la composition de boue provenant des unités de traitement des eaux de process varient considérablement en raison des différents types de procédés de fabrication. Le tableau suivant présente les plages des principaux composants chimiques de la boue [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998].

Substance	Plage (% en poids)	Substance	Plage (% en poids)
SiO ₂	40 – 60	K ₂ O	0,5 – 3,0
Al ₂ O ₃	5 – 15	TiO ₂	0 – 7
B ₂ O ₃	0 – 10	ZnO	1 – 8
Fe ₂ O ₃	0,1 – 5,0	BaO	0,1 – 3,0
CaO	5 – 15	PbO	0,1 – 15
MgO	0,5 – 3,0	ZrO ₂	1 – 15
Na ₂ O	0,5 – 3,0		

Tableau 3.30 Plages des principaux composants chimiques de la boue (fabrication de carreaux pour sols et murs)

La quantité de boue produite dans une fabrique de carreaux pour sols et murs va de 0,09 – 0,15 kg/m² de produit fini sur une base sèche. Pour un produit ayant une masse de pâte de 15 – 20 kg/m², ce chiffre correspond à 0,4 – 10 % (en kg de boue sèche / kg de pâte céramique).

3.3.5.2 Données de consommation

Consommation d'énergie pour le séchage par atomisation

Les valeurs de consommation d'énergie thermique types pour le procédé de séchage par atomisation des carreaux pour sols et murs se trouvent dans la plage de 980 – 2200 KJ/kg [23, TWG Ceramics, 2005].

Consommation d'énergie pour le séchage

La puissance de chauffage des brûleurs dans le séchoir est généralement faible, car l'excédent de chaleur du four est utilisé pour le séchage. Les séchoirs chauffés électriquement ne sont utilisés que dans une certaine mesure. Le flux d'effluents gazeux d'un séchoir chauffé électriquement est uniquement compris entre 100 et 300 m³/h [4, UBA, 2001].

Les valeurs de consommation d'énergie thermique types dans le procédé de séchage des carreaux pour sols et murs sont dans la plage de 250 – 750 kJ/kg (sur la base de la valeur calorifique inférieure du gaz naturel et du volume de gaz à 15 °C et 1013 mbar). En ce qui concerne les carrelages de catégorie BIb-II, des valeurs de consommation supérieures à 1400 KJ/kg sont également possibles [3, CERAME-UNIE, 2003].

Consommation d'énergie pour la cuisson

Le tableau suivant permet de comparer les besoins en énergie spécifiques de différents types de four (fours tunnels et fours à rouleaux). Les valeurs se réfèrent à une température de 1150°C. Les plages d'énergie requises sont indiquées pour les carreaux pour sols et murs cuits une fois (1x) et les carreaux pour sols et murs cuits deux fois (2x) [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Type de four	Plage (kJ/kg)
Four tunnel (2x)	5920 - 7300
Four tunnel (1x)	5420 – 6300
Four à rouleaux (2x)	3400 – 4620
Four à rouleaux (1x)	1900 – 4800

Tableau 3.31 : Exemples de besoins en énergie spécifiques de différents fours

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.14.

Le tableau suivant montre une comparaison de la consommation spécifique d'énergie thermique et d'énergie électrique par étape (phase) de procédé. Les données se réfèrent aux usines italiennes les plus significatives en termes de besoin d'énergie (6, Timellini, 2004).

Phase	Opération	Consommation de gaz naturel spécifique (GJ/t)	Consommation d'énergie électrique spécifique (GJ/t)
Préparation de la pâte	Meulage à sec		0,04 - 0,07
	Meulage humide		0,05 – 0,35
	Séchage par atomisation	1,1 – 2,2	0,01 – 0,07
Façonnage	Pressage		0,05 – 0,15
Séchage		0,3 – 0,8	0,01 – 0,04
Cuisson		1,9 – 4,8	0,02 – 0,15

Tableau 3.32 : Comparaison de la consommation spécifique d'énergie thermique et d'énergie électrique par étape de procédé

Consommation d'eau et de matières premières

En fonction des matières premières utilisées, le type de procédé de fabrication employé et les propriétés souhaitées des produits, différentes quantités d'eau et de matières premières sont employées.

Par exemple, dans la préparation de pâte sèche, la matière première pour la pâte est broyée à sec dans un broyeur à marteaux ou un broyeur de type pendulaire. Le mélange est ensuite humidifié à 7 – 12 % sur une base de poids sec. Dans ce cas, la matière granulée est séchée jusqu'à obtenir une teneur en humidité de 6 – 7 %.

Dans la préparation de pâte sèche, la matière première de la pâte est broyée par voie humide dans un broyeur à boulets, en mélangeant de l'eau à une teneur en humidité de 42 – 50 % sur une base sèche. La granulation a ensuite lieu en utilisant un procédé de séchage par atomisation et la matière granulée est séchée jusqu'à obtenir une teneur en humidité de 5 – 6 %.

On peut observer que lorsqu'un procédé humide est utilisé, la consommation d'eau est d'environ quatre fois plus élevée que dans le procédé sec. Cela signifie que la quantité d'eau employée, qui peut être réutilisée dans le même procédé de préparation de pâte, est plus importante dans le procédé humide que dans le procédé sec [10, Navarro, 1998] [23, TWG Ceramics, 2005].

3.3.6 Céramiques ornementales (céramiques domestiques)

3.3.6.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent dans la fabrication de céramiques domestiques. Dans la présente section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour les étapes de procédé de séchage par atomisation et de cuisson. Les émissions dans l'air résultant d'autres étapes de procédé, les émissions dans l'eau et les déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Le tableau suivant montre des données opérationnelles types et des plages d'émission de données d'un séchoir à atomisation appliqué dans la production de granulats de pressage pour l'industrie céramique domestique.

Source d'émission	Séchoir à atomisation
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	Jusqu'à 10000
Température des effluents gazeux (°C)	60

Composant d'émission	Concentration
Poussières	20 – 30 mg/m ³

Tableau 3.33 : Données opérationnelles et valeurs d'émission de poussières dans les gaz épurés d'un séchoir à atomisation

La poussière provenant d'un séchoir à atomisation est séparée dans un filtre ou dans une combinaison d'un cyclone et d'un séparateur par voie humide. Dans ce contexte, il doit également être mentionné que dans de nombreuses usines de céramiques domestiques modernes, les séchoirs à atomisation ne sont plus utilisés aujourd'hui, étant donné que les fournisseurs livrent des granulats de pressage ayant les paramètres requis [4, UBA, 2001].

Dans le procédé de cuisson du biscuit, des substances organiques se développent en raison de la décomposition ou de l'évaporation d'agents auxiliaires. Celles-ci sont émises à une température de 400°C environ dans la zone de préchauffage du four. Du benzène peut être produit dans ce procédé, dans la plage de 1 mg/m³ [3, CERAME-UNIE, 2003]. Le tableau suivant présente les plages de données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les compositions de gaz brut correspondantes résultant de la combustion de céramiques domestiques dans des fours tunnels [4, UBA, 2001], [1, BMLFUW, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005], [27, VDI, 2004], [21, Almeida, 2004].

Source d'émission	Four tunnel
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	3500 - 8000
Température des effluents gazeux (°C)	130 – 200

Composant d'émission	Concentration (mg/m ³)	Concentration (mg/m ³)
Cuisson	Cuisson du biscuit	Cuisson d'émail
Poussières	0,3 – 6,0	0,3 – 6,0
NO _x en équivalent NO ₂	13 – 110	20 – 150
Composés fluorés gazeux en équivalent HF	1 – 35	0,3 – 23
Substances org. en équivalent C total	Jusqu'à 40 ^{*)}	3 – 18
*) Dans le cas de pressage isostatique jusqu'à 100 mg/m ³		

Tableau 3.34 : Valeurs du gaz brut et données opérationnelles propres à une cuisson de céramiques domestiques

Les composés fluorés gazeux inorganiques, énumérés dans le tableau 3.34, se développent à des températures comprises entre 700 et 800°C, en raison de la décomposition de certaines substances dans les matières premières. La progression des émissions de fluor provenant d'un four tunnel est constante, en raison de la cuisson opérée en continu.

Le tableau suivant présente les données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) et les valeurs de gaz brut et épuré correspondantes (concentrations en poussières et HF) résultant de la cuisson de céramiques domestiques dans un four tunnel, dans le cadre d'un procédé de cuisson unique. Dans ce procédé de fabrication spécial, les produits sont généralement cuits en une seule fois et une précuisson est inutile. La cuisson prend 20 heures à une température de 1260°C et les effluents gazeux issus du four sont épurés avec un système de filtres à lit de chaux [13, SYKE, 2004], [17, Burkart, 2004], [22, SYKE, 2004].

Source d'émission	Four tunnel
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	20000
Température des effluents gazeux (°C)	137 – 156
O ₂ (%) ^{*)}	17,1 – 18,1

Composant d'émission	Concentration du gaz brut (mg/m ³)	Concentration du gaz épuré (mg/m ³)
Poussières	0,9	0,9
Composés fluorés gazeux en équivalent HF	7,0	0,224 – 0,293 ^{*)}
*) Trois mesures		
**) Température des effluents gazeux et teneur en O ₂ non spécifiées		

Tableau 3.35 : Valeurs des gaz bruts et épurés d'un procédé de cuisson de céramiques domestiques à une seule reprise

Dans les fours intermittents, des quantités plus élevées de composés fluorés gazeux inorganiques sont émises à des températures comprises entre 800 et 1150°C et leur volume d'effluents gazeux est compris entre 5000 et 20000 m³/h.

Les effluents gazeux provenant des procédés de cuisson de céramiques domestiques contiennent également d'autres substances polluant l'air telles que le CO, le CO₂ et les SO_x, et si la céramique est cuite dans un procédé de décoration complémentaire, les émissions issues de la cuisson de décoration doivent également être considérées. Les colles et liants d'images de transfert ou poix de peinture en couleur sont brûlés lors de la cuisson de décoration. Des substances organiques à forte odeur sont produites lors du procédé. Des émissions de métaux lourds supplémentaires provenant des pigments de couleur inorganiques (comprenant des oxydes de métaux lourds) peuvent se produire. Le tableau suivant montre des systèmes de pigment types, qui sont employés comme couleurs de décoration [4, UBA, 2001].

Couleur	Résistance à une température de 800 °C	Résistance à une température de 1200 °C
Vert	Oxyde de chrome, spinelle de chrome-cobalt	
Bleu	spinelle d'aluminium-zinc-chrome-cobalt, fusion de cobalt	Bleu de zirconium-vanadium
Jaune	Jaune de plomb-antimoine	Jaune d'étain-vanadium
Noir	Spinelle avec fer, cobalt, nickel, manganèse, chrome, cuivre, vanadium etc.	
Gris	Gris d'étain-antimoine, gris de zirconium-(cobalt, nickel)	
Marron	Spinelle de fer-chrome-zinc-manganèse, oxyde de fer	Rose de zirconium-fer
rouge	Pourpre de cassius, rouge de cadmium-(soufre, sélénium)	Rose d'étain-chrome-(calcium, silicium), pigment rouge de cadmium
Blanc	Oxyde de cérium, oxyde de titane	Oxyde d'étain, silicate de zirconium

Tableau 3.36 : Systèmes de pigments céramiques utilisés pour les couleurs de décoration

Le tableau suivant montre les plages de données opérationnelles et les concentrations massiques de composants de métal lourd résultant du procédé de cuisson de décoration de céramiques domestiques [4, UBA, 2001].

Source d'émission	Four de cuisson pour décoration
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	1000 - 3000
Température des effluents gazeux (°C)	~ 100

Composant de métal lourd	Concentration (mg/m ³)
Plomb	0,002 – 2,750
Cadmium	0,003 – 0,070
Cobalt	0,054 – 0,260
Nickel	0,060 – 0,400

Tableau 3.37 : Concentration de métaux lourds dans le gaz brut de cuisson de décoration

Les émissions dans l'air ne se produisent pas seulement pendant les procédés de séchage par atomisation et de cuisson, mais également pendant ces autres étapes du procédé de fabrication [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] :

- pendant le stockage et le transport interne de matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- des émissions de poussière résultent du procédé de préparation à sec de matières premières
- des émissions de poussière résultent du procédé de façonnage de masses sèches (pressage)
- dans certaines circonstances, des émissions gazeuses peuvent résulter du procédé de séchage. Si un excédent de chaleur du four est employé dans le procédé de séchage des produits crus, qui comprend les effluents gazeux provenant de la zone de cuisson et en l'absence de systèmes de chauffage fermés, des émissions de fluorure peuvent se produire
- des émissions de poussière peuvent résulter des procédés d'émaillage et d'engobage, en fonction de la technique d'émaillage et d'engobage appliquée
- les produits de céramique domestique sont souvent meulés après le procédé de cuisson. Par conséquent, de la poussière peut également résulter des procédés de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication des céramiques domestiques, les eaux de process résultent du nettoyage des unités de préparation et des unités de coulage de matières premières, à partir des procédés d'émaillage et de décoration, ainsi qu'à partir du procédé d'élimination de l'eau avec des filtres-presses et des filtres centrifuges ou à partir d'un meulage humide. Ces eaux de process contiennent les mêmes composants que les matières premières [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Le tableau suivant montre l'analyse des eaux de process d'un fabricant de vaisselle en porcelaine [4, UBA, 2001], [1, BMLFUW, 2003]. L'épuration des eaux de process est effectuée par homogénéisation, floculation, sédimentation, filtration dans un lit de sable et osmose inverse pour réduire la quantité d'eaux de process.

Paramètre	Unité	A partir de l'usine	Après épaisseur	Après filtre à sable	Concentrat après osmose inverse	Perméat après osmose inverse
pH		7,5	7,5	7,5	8,0	6,5
Conductivité	µS/cm	750	700	680	950	8
Dureté totale	dH	12,0	11,5	12,0	15,0	< 0,5
Résidu solide provenant de l'évaporation à 135°C	mg/l	1500	550	500	820	60
Chlore	mg/l	150	150	130	245	< 5
Sulfate	mg/l	100	100	110	280	< 10
Phosphate	mg/l	80,0	2,0	1,0	1,5	0,4
Acide silicique	mg/l	200	15	10	25	< 0,1
Calcium	mg/l	70	70	65	245	0,3
Magnésium	mg/l	9	7	7	23	< 0,1
Bore	mg/l	2,0	1,0	1,0	3,1	< 0,1
Zinc	µg/l	4500	< 100	< 100	< 100	< 100
Plomb	µg/l	250000	200	60	110	< 10
Cadmium	µg/l	60	2	2	3	< 1
Cr, Cu, Ni, Co	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
AOX	mg/l	0,001	-	-	0,007	< 0,001
DCO	mg/l	30	-	-	45	< 15

Tableau 3.38 : Analyse des eaux de process d'une fabrique de vaisselle en porcelaine

Un autre exemple d'une analyse d'eaux de process d'une usine de céramiques domestiques, qui fonctionne essentiellement avec un procédé de cuisson en une seule fois et où les eaux de process proviennent essentiellement du procédé d'émaillage et de la préparation de pâte, est présenté dans le tableau suivant [13, SYKE, 2004], [17, Burkhart, 2004], [22, SYKE, 2004].

Paramètre	Unité	Concentration avant traitement	Concentration après traitement	Réduction
pH		8,9	7,9	
DBO ₇	mg/l	7,4	5,4	27,0 %
DCO _{cr} , O ₂	mg/l	142	25	82,4 %
Matières en suspension	mg/l	8100	4,4	99,95 %
Cd	mg/l	0,0015	< 0,0005	> 66,7 %
Co	mg/l	12,0	0,020	99,83 %
Cr	mg/l	0,130	0,004	96,9 %
Cu	mg/l	0,110	0,029	73,6 %
Pb	mg/l	0,190	< 0,010	> 94,7 %
Zn	mg/l	4,0	0,220	94,5 %
Mn	mg/l	0,200	0,035	82,5 %

Tableau 3.39 : Analyse des eaux de process d'une installation de fabrication de céramique domestique

L'épuration des eaux de process est effectuée par un procédé de précipitation physico-chimique, qui comprend les étapes suivantes :

- bassin d'égalisation
- ajout de produits chimiques de précipitation et mélange rapide
- floculation
- ajout de polymère cationique et floculation
- sédimentation
- épaissement de la boue
- séchage de la boue avec un filtre sous-pression

L'eau traitée est le trop-plein du bassin de décantation et le volume d'eaux usées correspondant est de 145 m³/jour.

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (en particulier, du nettoyage d'unités), du nettoyage des unités de coulage et d'émaillage et également du meulage humide
- des moules en plâtre usagés et cassés peuvent résulter du procédé de coulage en barbotine
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration des effluents gazeux.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

La boue blanche issue du traitement des eaux de process comprend un mélange de kaolin, d'autres matières premières de céramique traditionnelles et une petite quantité de plâtre. Une analyse de la boue blanche présente les composants suivants : SiO₂ (66 – 70 %), Al₂O₃ (18 – 20 %), Na₂O (0,1 – 2 %), K₂O (3 – 3,5 %), CaO (1 – 3 %) [4, UBA, 2001].

3.3.6.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

Le tableau suivant présente les données de consommation d'énergie thermique et électrique d'un fabricant de vaisselle en porcelaine [1, BMLFUW, 2003].

Paramètre	Unité	Valeurs
Consommation d'énergie électrique	MJ/kg de produit	4,5
Consommation d'énergie thermique	MJ/kg de produit	70

Tableau 3.40 : Données de consommation d'énergie thermique et électrique propres à une fabrique de vaisselle en porcelaine

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.17 et le tableau 2.18.

Consommation d'eau et de matières premières

Des exemples de données de consommation d'eau et de matières premières pour la fabrication de vaisselle en porcelaine sont présentés sur la figure suivante sous la forme d'un schéma de débit massique [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics 2005]. On peut voir le débit massique de produits non décorés, préséchés par des filtres-presses et fabriqués sur des machines de calibrage.

Glaze	Email
Kaolin	Kaolin
Feldspar	Feldspath
Water	Eau
Preparing and shaping	Préparation et façonnage
Broken ware	Déchets de casse
Filtrate water	Eau de filtrat
Chipping	Ecaillage
Screening loss	Perte de criblage
Natural gaz	Gaz naturel
Drying	Séchage
Flue-gas	Effluents gazeux
Broken ware	Déchets de casse
Firing (biscuit firing)	Cuisson (cuisson de biscuit)
Glazing	Emaillage
Process waste water	Eaux de process
Firing (glost firing)	Cuisson (cuisson d'émail)
Air	Air
Household ceramics	Céramique domestique

Figure 3.7 : Exemple de débit massique pour la fabrication de vaisselle

3.3.7 Appareils sanitaires

3.3.7.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent lors de la fabrication d'appareils sanitaires. Dans cette section, des plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson d'appareils sanitaires. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Les appareils sanitaires sont cuits dans des fours tunnels ou des fours à rouleaux. Une production à petite échelle est cuite dans des fours intermittents. Le tableau suivant montre les compositions de gaz brut et de gaz épuré correspondantes, ainsi que les données opérationnelles (dans la section supérieure du tableau) d'un four tunnel utilisé dans une usine de sanitaires type. Dans cet exemple, les effluents gazeux sont épurés dans un procédé de sorption à sec en utilisant des modules adsorbants alvéolaires, dans un conteneur en acier [4, UBA, 2001].

Source d'émission	Four tunnel
Débit volumique des effluents gazeux (m ³ /h)	9100
Température des effluents gazeux (°C)	140 – 180

Composant d'émission	Concentration de gaz brut (mg/m ³)	Concentration de gaz épuré (mg/m ³)
Poussières	10	3
NO _x en équivalent NO ₂	30	20
CO	200	200
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	1,3 – 3,6	0,4 – 1,5

Tableau 3.41 : Exemple de compositions des gaz bruts et épurés issus d'un four tunnel

Le tableau suivant présente les concentrations de gaz brut dans les fours tunnels ou intermittents (réf. : 18 % O₂, combustible : gaz naturel) [1, BMLFUW, 2003], [22, SYKE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

Composant d'émission	Concentration (mg/m ³)	Concentration (mg/m ³)
Source d'émission	Four tunnel	Four intermittent
Poussières	1 – 20	≤ 40
NO _x en équivalent NO ₂	10 - 50 ^{*)}	10 - 50
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	1 - 25	≤ 80
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	1 – 30	≤ 90
SO ₂ ^{**))}	1 - 100	Sans objet
^{*)} Avec un mélange de combustible GPL/fioul lourd jusqu'à 90 mg/m ³ de NO ₂		
^{**))} Avec un mélange de combustible GPL/fioul lourd		

Tableau 3.42 : Concentrations des gaz bruts issus de fours tunnel et intermittents

Le tableau suivant présente des exemples de concentration de gaz épuré de deux fabriques d'appareils sanitaires. Les valeurs de gaz épuré ont été obtenues après une première cuisson dans des fours tunnels et un traitement des effluents gazeux avec des systèmes d'adsorbants à lit à garnissage de chaux (réf. 18 % O₂, combustible : gaz naturel) [1, BMLFUW, 2003].

Composant d'émission	Fabrique 1 Concentration (mg/m ³)	Fabrique 2 Concentration (mg/m ³)
Poussières	3,2	5,0
Cobalt	< 0,1	-
Nickel	< 0,1	-
Chrome	< 0,1	-
Manganèse	< 0,1	-
Vanadium	< 0,1	-
Etain	< 0,1	-
Antimoine	< 0,1	-
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	0,8	-
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	0,8	-
SO _x en équivalent SO ₂	6,0	20

Tableau 3.43 : Exemples de concentrations de gaz épuré de deux fabriques d'appareils sanitaires

Les émissions dans l'air ne se produisent pas uniquement pendant le procédé de cuisson, mais également pendant ces autres étapes du procédé de fabrication [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] :

- pendant le stockage et le transport interne de matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- des émissions de poussière résultent des procédés de préparation à sec de matières premières dures
- dans certaines circonstances, des émissions gazeuses peuvent résulter du procédé de séchage. Si un excédent de chaleur provenant du four est employé dans le procédé de séchage des produits crus, qui comprend des effluents gazeux provenant de la zone de cuisson, et en l'absence de système de chauffage fermé, des émissions de fluorure en particulier peuvent se produire
- des émissions de poussière peuvent se produire pendant le procédé de pulvérisation de l'émail
- des émissions de poussière peuvent résulter des procédés de polissage et de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication d'appareils sanitaires, des eaux de process sont produites pendant le nettoyage des unités de préparation de matières premières et des unités de coulage, ainsi qu'à partir du procédé d'émaillage ou du meulage humide. Ces eaux de process contiennent les mêmes composants que les matières premières et peuvent être réutilisées (principalement comme eau de nettoyage) [23, TWG Ceramics, 2005].

Le tableau suivant présente un exemple de concentrations de polluants des eaux de process épurées et les charges quotidiennes correspondantes provenant de la fabrique de sanitaires (échantillon composite après sédimentation) [1, BMLFUW, 2003].

Paramètre	Concentration (mg/l)	Charge (g/jour)
Zinc	0,05	1,0
Nickel	< 0,01	< 0,2
Plomb	< 0,01	< 0,2
Cuivre	< 0,01	< 0,2
Chrome	< 0,01	< 0,2
Chrome (VI)	< 0,05	< 0,01
Cobalt	< 0,01	< 0,2
Etain	< 0,01	< 0,2
Cadmium	< 0,005	< 0,01
Antimoine	< 0,01	< 0,2
Baryum	0,32	6,4
Sulfate	53	1060
pH	7,7	-

Tableau 3.44 : Concentrations en polluants des eaux de process épurées

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (en particulier, du nettoyage des unités), du nettoyage des unités de coulage et d'émaillage et également, du meulage humide
- des moules en plâtre usagés et cassés peuvent résulter du procédé de coulage en barbotine
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration des effluents gazeux.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

La boue blanche issue du traitement des eaux de process comprend un mélange de kaolin, d'autres matières premières de céramique traditionnelles et une petite quantité de plâtre. Une analyse de la boue blanche présente les composants suivants : SiO_2 (66 – 70 %), Al_2O_3 (18 – 20 %), Na_2O (0,1 – 2 %), K_2O (3 – 3,5 %), CaO (1 – 3 %) [4, UBA, 2001].

3.3.7.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

Des plages de besoins en énergie spécifiques et autres données opérationnelles de différents fours sont présentées dans le tableau suivant [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [27, VDI, 2004].

Type de four	Température (°C)	Temps de cuisson (h)	Besoin en énergie spécifique (kJ/kg)	Rendement (t/h)
Four tunnel classique	1230 – 1270	16 – 24	9100 – 12000	0,8 – 1,0
Four tunnel moderne avec une isolation en fibre légère	1230 - 1260	10 – 18	4200 – 6700	1,0 – 2,0
Four à rouleaux	1230 - 1260	8 – 12	3500 – 5000	0,8 – 1,0
Four intermittent moderne, cuisson de réparation	1180 - 1220	12 – 23	8300 – 10400	5 – 15 ^{*)}
Four intermittent moderne, première cuisson	1240 - 1260	12 - 23	9200 - 11300	5 – 15 ^{*)}
^{*)} resp. (t/cycle)				

Tableau 3.45 : Données opérationnelles et rendement des différents fours

Dans ce contexte, voir également le tableau 2.21, le tableau 2.22 et le tableau 2.23.

Le tableau suivant présente des exemples de données de consommation d'énergie thermique et électrique de trois fabriques de sanitaires. [1, BMLFUW, 2003].

Paramètre	Unité	Fabrique 1	Fabrique 2	Fabrique 3
Capacité de production	t/an	10000	5120	2900
Utilisation des matières premières	t/an	17000	7801	3500
Consommation d'énergie électrique	MJ/kg de produit	0,36	3,32	3,16
Consommation d'énergie thermique	MJ/kg de produit	30	22	28

Tableau 3.46 : Données de consommation d'énergie

Consommation d'eau et de matières premières

Des exemples de données de consommation d'eau et de matières premières pour la fabrication d'appareils sanitaires sont présentés sur la figure suivante sous la forme d'un schéma de débit massique [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics 2005]. Les produits sont réalisés en porcelaine vitrifiée et leur façonnage est réalisé lors du procédé de coulage en barbotine en utilisant des moules de plâtre.

Glaze	Email
Kaolin and clay	Kaolin et argile
Hard raw materials	Matières premières dures
Water	Eau
Preparation	Préparation
Slip recycle	Recyclage de barbotine
Slip storage homogenisation	Homogénéisation du stockage de barbotine
Shaping (slip casting)	Façonnage (coulage en barbotine)
Process waste water	Eaux de process
Natural gaz	Gaz naturel
Drying and white treatment	Séchage et traitement blanc
Flue-gas	Effluents gazeux
chipping	Ecaillage
Glazing	Emaillage
Process waste water	Eaux de process
Broken ware	Déchets de casse
Firing	Cuisson
Air	Air
Sanitaryware	Appareils sanitaires

Figure 3.8 : Exemple de débit massique pour la fabrication d'appareils sanitaires

3.3.8 Céramiques techniques

3.3.8.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent lors de la fabrication de céramiques techniques. Dans cette section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour la cuisson de porcelaines électriques. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Le tableau suivant montre des plages de concentration de gaz brut et les débits massiques des fours intermittents pendant la cuisson des isolants électriques [1, BMLFUW, 2003].

Composant d'émission ¹⁾	Concentration (mg/m ³)	Débit volumique (g/h)
Poussières	20 – 30	Jusqu'à 600
NO _x en équivalent NO ₂	20 – 120	Jusqu'à 2400
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	Jusqu'à 120	Jusqu'à 2400
¹⁾ réf. à 18 % en vol de O ₂		

Tableau 3.47 : Concentrations des gaz bruts dans la cuisson des isolants électriques

Le tableau suivant présente un exemple de concentration d'effluents gazeux provenant d'un four intermittent pendant la cuisson d'isolants électriques. Le four (voir également la Section 2.3.8) n'est pas équipé d'un système d'épuration des effluents gazeux [1, BMLFUW, 2003].

Composant d'émission ¹⁾	Concentration (mg/m ³)	Débit massique (g/h)
CO	91	658
NO _x en équivalent NO ₂	39	282
Composés fluorés gazeux inorganiques en équivalent HF	11,3	82
Composés chlorés gazeux inorganiques en équivalent HCl	2,5	18
SO _x en équivalent SO ₂	2,8	20
Matière organique	6,3	45
¹⁾ réf. à 18 % en vol de O ₂ , pas de mesure de particules/poussières		

Tableau 3.48 : Concentrations des effluents gazeux issus d'un four intermittent pendant la cuisson d'isolants électriques

Les données d'émission concernant les émissions dans l'air résultant des procédés de cuisson d'autres céramiques techniques ne sont pas disponibles, mais si les pâtes céramiques techniques contiennent des additifs organiques, des COV peuvent également être produits pendant le procédé de cuisson [17, Burkart, 2004].

Les émissions dans l'air ne se produisent pas seulement pendant les procédés de cuisson, mais également pendant ces autres étapes de procédé de fabrication [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [24, VKI-Germany, 2004] :

- pendant le stockage et le transport interne de matières premières, des émissions de poussière se produisent dans les unités de stockage, pesage, transport et manutention
- des émissions de poussière résultent des procédés de préparation à sec de matières premières
- des émissions de poussière résultent du procédé de façonnage de masses sèches (pressage)
- des émissions de poussière peuvent résulter des procédés d'émaillage et d'engobage, en fonction de la technique d'émaillage ou d'engobage appliquée
- dans certaines circonstances, des émissions gazeuses peuvent résulter du procédé de séchage. Si un excédent de chaleur du four est employé dans le procédé de séchage des produits crus, qui comprend les effluents gazeux provenant de la zone de cuisson et en l'absence de systèmes de chauffage fermés, des émissions gazeuses peuvent se produire
- A partir des procédés de combustion et de précuisson, des émissions gazeuses, en particulier des COV, peuvent se produire.

Emissions dans l'eau

Dans la fabrication de céramiques techniques, des eaux de process sont produites pendant le nettoyage des unités de préparation de matières premières et des unités de coulage, à partir des procédés d'émaillage et d'engobage, ou à partir d'un usinage humide. Ces eaux de process contiennent les mêmes composants que les matières premières [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005] [24, VKI,-Germany, 2004].

Le tableau suivant présente les concentrations en polluants dans les eaux de process épurées provenant d'une fabrique d'isolants électriques (voir également la section 2.3.8) après floculation, séparation avec un clarificateur à tôles inclinées et filtration avec un filtre-pressé à chambre (cinq échantillons composites par jour) [1, BMLFUW, 2003].

Paramètre	Concentration (mg/l)				
Matière filtrable	-	22	36	53	15
Aluminium	-	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,90
Fer-II	< 0,01	-	-	-	-
Fer-III	< 0,01	-	-	-	-
Fer total	< 0,01	2,64	1,15	0,056	0,1481
Fluorure	-	0,33	-	-	-
DCO	-	19	-	-	-
COT	< 0,05	1,60	-	-	-
pH	8,12	6,24	5,87	6,65	7,37

Tableau 3.49 : Concentrations dans des eaux de process épurées provenant d'une fabrique d'isolants électriques

Le tableau suivant présente les concentrations en polluants dans les eaux de process provenant d'une fabrique d'isolants électriques après floculation sans filtration (échantillon qualifié) [23, TWG Ceramics, 2005].

Paramètre	Unité	Valeur
pH	-	7,2
Matières en suspension	mg/l	< 3
DCO	mg/l	53
COT	mg/l	15
AOX	mg/l	0,02
Chrome (total)	mg/l	< 0,01
Plomb	mg/l	< 0,05
Cadmium	mg/l	< 0,005
Cuivre	mg/l	< 0,01
Nickel	mg/l	< 0,1
Zinc	mg/l	0,3
Aluminium	mg/l	0,23
Cobalt	mg/l	0,016

Tableau 3.50 : Concentration dans des eaux de process provenant d'une fabrique d'isolants électriques après floculation

Le tableau suivant présente des concentrations en polluants dans les eaux de process provenant d'une fabrique de produits céramiques piézoélectriques après filtration finale, traitement en lots (échantillon qualifié) (23, TWG Ceramics, 2005).

Paramètre	Unité	Valeur
pH	-	8,0
Matières en suspension	mg/l	< 3
DCO	mg/l	597
COT	mg/l	200
AOX	mg/l	< 0,1
Plomb	mg/l	< 0,1
Cadmium	mg/l	< 0,01
Cuivre	mg/l	< 0,01
Nickel	mg/l	< 0,1
Zinc	mg/l	0,04
Antimoine	mg/l	< 0,02

Tableau 3.51 : Concentrations dans des eaux de process épurées provenant d'une fabrique de produits céramiques piézoélectriques

Les données d'émission concernant les émissions dans l'eau provenant des procédés de fabrication d'autres céramiques techniques ne sont pas disponibles.

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter de la préparation des matières premières (en particulier, du nettoyage des unités), du nettoyage des unités de coulage, émaillage et engobage, ainsi que d'un usinage humide
- des moules en plâtre usagés et cassés peuvent résulter du procédé de coulage en barbotine
- des émulsions d'usinage peuvent être produites par le traitement de surface mécanique
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont trouvés dans les unités d'épuration des effluents gazeux.

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [24, VKI-Germany, 2004]..

3.3.8.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

Le tableau suivant présente les données de consommation d'énergie thermique et électrique de deux fabriques de porcelaine électrique [1, BMLFUW, 2003].

Paramètre	Unité	Fabrique 1	Fabrique 2
Consommation d'énergie électrique	MJ/kg de produit	-	0,94
Consommation d'énergie thermique	MJ/kg de produit	25	15,30

Tableau 3.52 : Données de consommation d'énergie provenant de deux fabriques de porcelaine électrique

La consommation d'énergie thermique spécifique d'un four intermittent avec une capacité de four de 70 m³ et une capacité de production de 10 – 25 tonnes d'isolants électriques par cycle de cuisson est comprise entre 12000 et 20000 kJ/kg [1, BMLFUW, 2003].

Les données de consommation d'énergie des procédés de fabrication d'autres céramiques techniques ne sont pas disponibles.

Consommation d'eau et de matières premières

Le tableau suivant montre des plages de compositions de gaz brut pour la fabrication de porcelaine électrique (porcelaine d'alumine). La plage de la teneur en eau de la masse est comprise entre 30 et 50 % [23, TWG Ceramics, 2005].

Matière première	Quantité (%)
Kaolin	30 – 40
Argile	6 – 15
Feldspath	10 – 20
Quartz	0 – 30
Alumine	0 – 40

Tableau 3.53 : Compositions de matières premières pour la fabrication de porcelaine électrique

Les données de consommation d'eau et de matières premières des procédés de fabrication d'autres céramiques techniques ne sont pas disponibles.

3.3.9 Abrasifs inorganiques

3.3.9.1 Données d'émission

Des émissions dans l'air et dans l'eau, des déchets de production et également des émissions de bruit se produisent lors de la fabrication d'abrasifs inorganiques. Dans cette section, les plages d'émissions de polluants atmosphériques sont présentées pour le procédé de cuisson. Des émissions dans l'air d'autres étapes de procédé, des émissions dans l'eau et des déchets de production sont également décrits.

Emissions dans l'air

Le tableau suivant montre des plages de concentration d'effluents gazeux de trois fabriques dans lesquelles sont fabriqués des abrasifs inorganiques (voir également, Section 2.3.9) [14, UBA, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Composant d'émission	Unité	Fabrique 1 ¹⁾	Fabrique 2 ²⁾	Fabrique 3 ³⁾
CO	t/an	372	143	216
Poussières	mg/m ³	12	< 15	< 15
COT	mg/m ³	< 43	39	< 40

¹⁾ Cette fabrique est un exemple type utilisé pour la fabrication d'abrasifs inorganiques (de la préparation des matières premières au conditionnement des abrasifs). Les abrasifs sont cuits dans un four à gaz ayant une capacité de 10,4 m³ et une densité d'enfournement moyenne de 360 kg/m³. Les composants d'installation suivants sont utilisés : filtres à manches pour la séparation de la poussière (pour les unités de mélange et de meulage et pour les procédés de finition), pour la postcombustion thermique des effluents gazeux provenant du four et des unités de finition communes.

²⁾ Cette fabrique est spécialisée dans la production de petits outils de meulage. La fabrique fonctionne sur une période de travail et les abrasifs sont cuits dans des fours intermittents chauffés électriquement. La fabrique compte trois fours intermittents identiques ayant un volume pouvant atteindre 5,28 m³ chacun (volume utilisable 4,4 m³). La densité d'enfournement varie entre 700 et 1400 kg/m³ (partage des auxiliaires de cuisson entre 33 et 50 %). Les composants d'installation suivants sont utilisés : filtres à manche pour la séparation de la poussière (pour les unités de mélange et de meulage et pour les processus de finition), pour la postcombustion thermique des effluents gazeux provenant des fours, décanteurs pour les eaux usées de traitement provenant du nettoyage des agrégats et unités de finition communes.

³⁾ Cette fabrique est un exemple de petite unité de fabrication d'abrasifs inorganiques (meules ayant un diamètre de 100 à 1000 mm). Les abrasifs sont cuits dans un four périodique intermittent à gaz ayant une capacité de 5 m³ et une densité d'enfournement de la liaison vitrifiée comprise entre 70 et 140 kg/m³ (voir section 2.3.9.5). Les composants d'installation suivants sont également utilisés : filtres à manches pour la séparation de la poussière provenant des unités de mélange et meulage et pour les procédés de finition.

Tableau 3.54 : Exemples de valeurs des effluents gazeux de trois fabriques dans lesquelles sont fabriqués des abrasifs inorganiques

Les émissions dans l'air ne se produisent pas uniquement pendant le procédé de cuisson, mais également pendant ces autres étapes de traitement de fabrication [14, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005] :

- des émissions de poussières peuvent résulter des procédés de préparation à sec, de mélange et de pressage des matières premières,
- des émissions de poussières peuvent résulter des procédés de meulage à sec.

Emissions dans l'eau

La fabrication d'abrasifs inorganiques n'entraîne que la production de petites quantités d'eaux de process. Dans certains cas, une fabrication exempte même d'eaux usées est possible (épuration des unités d'installation par chauffage et abrasion des contaminants). Dans les cas où des eaux de process sont toutefois produites, il s'agit de façon prédominante d'eau de nettoyage provenant des unités d'installation [14, UBA, 2004].

Déchets de production

- des produits peuvent être cassés pendant les différentes étapes du procédé de fabrication (en particulier, le façonnage, le séchage, la cuisson et les traitements ultérieurs)
- de la boue peut résulter, en particulier du nettoyage des unités
- des émulsions d'usinage peuvent résulter des opérations de façonnage et de traitement de surface mécanique
- des déchets, tels que des plastiques, des déchets de papier et de la ferraille, résultent du procédé d'emballage
- de la poussière, de la boue et des agents de sorption usagés sont présents dans les unités d'épuration des effluents gazeux

Une partie des déchets de production accumulés qui sont mentionnés ci-dessus peut être recyclée et réutilisée au sein de l'usine, selon les spécifications des produits et les exigences des procédés. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont évacuées hors de l'usine sous forme de déchets et sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets [14, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005].

3.3.9.2 Données de consommation

Consommation d'énergie

Le tableau suivant présente les données de consommation d'énergie globale de trois fabriques d'abrasifs inorganiques mentionnés dans le tableau 3.54 [14, UBA, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Paramètre	Unité	Fabrique 1 (t/an)	Fabrique 2 (t/an)	Fabrique 3 (t/an)
Consommation d'énergie électrique	KWh/an	150000	1540000	175000
Consommation de gaz naturel	KWh/an	1850000	946000	1000000

Tableau 3.55 : Consommation d'énergie globale de trois fabriques d'abrasifs inorganiques

Consommation d'eau et de matières premières

Le tableau suivant présente des données de consommation d'eau et de matières premières des trois fabriques d'abrasifs inorganiques mentionnées dans le tableau 3.54 [14, UBA, 2004], [30, TWG Ceramics, 2005].

Entrée	Sortie	Fabrique 1 (t/an)	Fabrique 2 (t/an)	Fabrique 3 (t/an)
Grains abrasifs		216	440	153
Liants		35,2	110	17
Additifs ¹⁾		15,2	41,8	7
Arbres et manchons en acier		-	17,6	-
	Produit	253,6	550	170
	Poussière abrasive	32	55	26
	Déchets de casse ²⁾	7	7	4

¹⁾ Se décomposant partiellement au cours du processus de cuisson

²⁾ Comprennent des auxiliaires de cuisson cassés

Tableau 3.56 : Données de consommation de matière première de trois fabriques d'abrasifs inorganiques

4. TECHNIQUES A PRENDRE EN COMPTE LORS DE LA DETERMINATION DES MTD POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES

Le présent chapitre recense les techniques généralement considérées comme pouvant permettre d'obtenir un niveau élevé de protection de l'environnement dans les secteurs industriels abordés dans le présent document. Il inclut les systèmes de management, les techniques intégrées aux procédés et les mesures curatives, mais lorsqu'on cherche à obtenir les meilleurs résultats possibles, on observe un certain degré de recouvrement entre ces trois catégories.

Les procédures de prévention, de contrôle, de minimisation et de recyclage sont prises en compte, ainsi que la réutilisation des matières et de l'énergie.

Ces techniques peuvent être présentées individuellement ou sous forme de combinaisons permettant d'atteindre les objectifs de l'IPPC. L'annexe IV de la Directive recense un certain nombre de considérations générales à prendre en compte lors de la détermination des MTD, et les techniques évoquées dans ce chapitre concernent une ou plusieurs de ces considérations. Dans la mesure du possible, la structure employée pour décrire chaque technique est la même, ce qui permet de comparer les différentes techniques et de les évaluer de manière objective par rapport à la définition des MTD donnée dans la Directive.

Le contenu de ce chapitre ne constitue pas une liste exhaustive de ces techniques, et il se peut que d'autres techniques, qui sont tout aussi valables dans le cadre des MTD, existent ou soient actuellement en cours de mise au point.

En règle générale, chaque technique est décrite selon une structure standard, comme le montre le tableau 4.1 :

Type d'information pris en compte	Type d'information présenté
Description	Description technique
Bénéfices environnementaux réalisés	Principale(s) incidence(s) environnementale(s) visée(s) par cette technique (de transformation ou de réduction), y compris les valeurs d'émission obtenues et les performances en termes d'efficacité. Avantages que présente cette technique pour l'environnement par rapport à d'autres.
Effets inter-milieux	Effets secondaires et inconvénients éventuellement provoqués par la mise en œuvre de cette technique. Détails quant aux problèmes environnementaux que pose cette technique par rapport à d'autres
Données opérationnelles	Données sur les performances en termes d'émissions/déchets et de consommation (matières premières, eau et énergie). Autres informations utiles sur les modalités d'utilisation, de maintenance et de contrôle de la technique, y compris les aspects sécuritaires, les contraintes d'exploitabilité de la technique, la qualité en sortie etc.
Applicabilité	Prise en compte des facteurs associés à l'application et à la mise en conformité de la technique (par ex. espace disponible, spécificité par rapport à un procédé)
Aspects économiques	Informations sur les coûts (d'investissement et d'exploitation) ainsi que sur les économies possibles (par ex. réduction de la consommation de matières premières, des frais d'évacuation des déchets) par rapport à la capacité de cette technique
Elément(s) moteur(s) de la mise en œuvre	Motifs de la mise en œuvre de cette technique (par ex. autre législation, amélioration de la qualité de fabrication)
Installations types	Renvoi vers des installations réputées utiliser cette technique
Littérature de référence	Ouvrages offrant des renseignements supplémentaires concernant la technique

Tableau 4.1 : Détail des informations relatives à chacune des techniques décrites au présent chapitre

Etant donné que les frontières entre les différents éléments susmentionnés sont susceptibles d'être plus ou moins en recouvrement, cette structure reste souple afin de mieux refléter tel ou tel cas particulier.

Les coûts liés aux techniques de réduction doivent être évalués par rapport à la dimension de l'installation, à l'efficacité de ces techniques et aux conditions dans lesquelles elles sont

individuellement employées. A ce sujet, le tableau 4.7 donne des exemples des coûts d'investissement, des coûts d'entretien, des coûts de sorbants et des coûts d'exploitation liés à la réduction des poussières, des composés gazeux inorganiques et des composés gazeux organiques, réalisée au moyen de différentes techniques de réduction [32, TWG Ceramics, 2006].

En ce qui concerne les conditions standard des mesures de débits volumétriques et de concentrations, le lecteur peut se reporter aux définitions suivantes, qui figurent également au glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, les débits volumétriques correspondent à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des effluents gazeux secs à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal et les concentrations en benzène correspondent à 15 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
état normal	désigne une température de 273 K et une pression de 1013 hPa.

4.1 Réduction des consommations d'énergie (efficacité énergétique)

A ce sujet, le lecteur trouvera également des renseignements utiles en consultant le document de référence sur les techniques d'efficacité énergétique (ENE), qui est en cours de rédaction.

4.1.1 Conception améliorée des fours et des séchoirs

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Cette section présente plusieurs mesures qui peuvent être appliquées à des systèmes de four/séchoir, individuellement ou en combinaison :

- commande automatique des circuits de séchage
- commande automatique de l'humidité et de la température régnant à l'intérieur du séchoir
- dans les séchoirs, installation de ventilateurs à impulsion répartis dans différentes zones, avec un apport thermique indépendant (réglable par zone) pour obtenir la température nécessaire
- une meilleure étanchéité des fours, notamment grâce à des caissons métalliques et à des joints de sable ou d'eau pour les fours tunnel et les fours intermittents, permettant de réduire les pertes de chaleur
- une meilleure isolation thermique des fours, notamment grâce à l'utilisation de revêtements réfractaires ou de fibres céramiques (laine minérale), permettant de réduire les pertes de chaleur
- de meilleurs revêtements réfractaires des fours et des supports de wagonnets, permettant de réduire le temps d'arrêt pour refroidissement et, donc, les pertes de chaleur associées (« pertes à la sortie »)
- utilisation de brûleurs à haute impulsion pour améliorer l'efficacité de la combustion et le transfert thermique
- le remplacement de fours anciens par des fours tunnels neufs, plus grands et plus larges ou de même capacité ou - si le procédé de fabrication le permet - par des fours à cuisson rapide (p. ex. des fours à rouleaux), pouvant permettre de réduire la consommation spécifique en énergie
- une commande interactive par ordinateur des régimes de cuisson du four, permettant de réduire la consommation d'énergie et de diminuer les émissions de polluants atmosphériques
- une utilisation réduite des auxiliaires de cuisson et/ou l'utilisation d'auxiliaires de cuisson à base de SiC/superalliages permettant de réduire l'apport en énergie nécessaire au chauffage du système de four ; les auxiliaires de cuisson en SiC peuvent également être employés dans des fours utilisant une technologie de cuisson rapide par rouleaux
- l'optimisation (minimisation) du passage entre le séchoir et le four ainsi que l'utilisation de la zone de préchauffage du four pour finir le procédé de séchage - si le procédé de fabrication le permet - permettant d'éviter de refroidir inutilement les produits séchés avant de procéder à leur cuisson
- la réduction de la quantité d'air circulant dans le four rotatif lors de la fabrication des granulats d'argile expansée, permettant de réduire la consommation en énergie.

La plupart des mesures mentionnées ci-dessus peuvent également s'appliquer à des séchoirs, par exemple pour la conception des séchoirs (meilleure isolation thermique, isolations des portes ou verrous etc.), les auxiliaires de cuisson et la commande des procédés, notamment en raison du fait que les séchoirs et les fours sont très souvent reliés à un système de récupération de chaleur (voir section 4.1.2).

Effets inter-milieux

Sans objet.

Données opérationnelles

Elles dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier ; par exemple, les besoins énergétiques spécifiques de différents produits cuits dans différents types de four (traditionnel, à cuisson rapide, avec ou sans isolation améliorée) sont comparés au tableau 2.14 (fabrication des carreaux pour murs et sols), au tableau 3.31 (fabrication des carreaux pour murs et sols) et au tableau 3.45 (fabrication des appareils sanitaires).

Applicabilité

En principe, la plupart des mesures mentionnées ci-dessus peuvent s'appliquer à tous les secteurs de la céramique, mais la technologie du four à rouleaux, par exemple, s'applique principalement à la fabrication des carreaux de murs et de sols. Cela dit, les tuiles, les tuyaux en grès et les appareils sanitaires peuvent également être cuits dans des fours à rouleaux (voir section 2.2.7.4.3).

Les mesures qui concernent plus particulièrement les fours intermittents, tunnel et à rouleaux (notamment en ce qui concerne les wagonnets et les auxiliaires de cuisson) ne peuvent être appliquées aux fours rotatifs, dans lesquels sont fabriqués les granulats en argile expansée (voir section 2.3.4). Par ailleurs, au sein de chaque secteur, l'applicabilité des différentes technologies de fours va dépendre des types de produits qui sont fabriqués ; ainsi, il convient de cuire certains types de carreaux pour sols et murs dans des fours tunnels, pour que le produit présente les propriétés souhaitées.

Aspects économiques

La modernisation des fours et/ou des séchoirs utilisés, ou le simple fait de les remplacer par de nouveaux systèmes moins gourmands en énergie, comme les fours à rouleaux, permet - le cas échéant - de réaliser des économies d'énergie substantielles pour l'entreprise. Si ces équipements sont remplacés avant d'être arrivés en fin de vie, l'investissement en capital sera conséquent.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- économiser de l'argent en économisant de l'énergie
- réduction des émissions de CO₂.

Installations types et littérature de référence

[1, BMLFUW, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

4.1.2 Récupération de la chaleur résiduelle des fours

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Aujourd'hui, de nombreux fours utilisent l'air chaud récupéré des zones de refroidissement des fours tunnels, généralement complété par l'air chaud provenant des brûleurs à gaz, de sorte que le schéma d'implantation de l'installation est très important. En particulier, une chaleur résiduelle à basse température ne peut être utilement exploitée que si la longueur des tuyaux, c'est-à-dire la distance entre le point de génération de la chaleur résiduelle et son point d'utilisation, est très limitée. En tout état de cause, il faut que les tuyaux aient une isolation thermique adéquate. Des gains d'énergie extrêmement importants ont été réalisés de cette manière.

Certains procédés emploient également des échangeurs de chaleur pour récupérer la chaleur provenant des effluents gazeux afin de préchauffer l'air de combustion, mais cette application reste limitée, à cause des risques de corrosion liés à l'acidité des effluents gazeux et de leurs températures souvent trop basses.

La chaleur résiduelle provenant d'un brûleur de postcombustion peut également être utilisée, soit dans le four soit dans le séchoir. En Allemagne, une usine utilise une huile comme fluide caloporteur pour transmettre la chaleur résiduelle du brûleur de postcombustion au séchoir, en combinaison avec l'air chaud provenant de la zone de refroidissement du four. Le principe de fonctionnement de ce système mixte de recyclage de la chaleur est illustré sur la figure suivante [4, UBA, 2001].

En complément de la chaleur résiduelle (4) utilisée dans la chaudière de récupération de chaleur (5) et pour chauffer le préchauffeur (1), la chaleur résultant du refroidissement des effluents gazeux épurés est récupérée dans un échangeur de chaleur des effluents gazeux (7) et alimente ensuite d'autres échangeurs de chaleur (8) par une huile utilisée comme fluide caloporteur, pour chauffer de l'air frais (9) pour le séchage. Cet air frais chauffé se mélange à de l'air chaud provenant de la zone de refroidissement (4) du four (2) et alimente un séchoir à palettes (11) qui fonctionne en continu.

1 Preheater	1 Préchauffeur
2 Tunnel Kiln	2 Four tunnel
3 Under-car cooling air	3 Air de refroidissement sous wagonnet
4 Hot air from cooling zone	4 Air chaud provenant de la zone de refroidissement
5 Boiler	5 Chaudière
6 Thermoreactor	6 Thermoréacteur
7 Flue-gas heat exchanger	7 Echangeur de chaleur des effluents gazeux
8 Heat exchanger	8 Echangeur de chaleur
9 Fresh air	9 Air frais
10 Hot air	10 Air chaud
11 Casing pallet-dryer	11 Séchoir à palettes

Figure 4.1 : Vue schématique d'un exemple de système mixte de recyclage de la chaleur

Effets inter-milieux

Une légère augmentation de la consommation d'énergie est possible, notamment en cas d'utilisation de circuits d'échange de chaleur.

Données opérationnelles

Dans le cas du système mixte de recyclage de la chaleur présenté ci-dessus, les besoins énergétiques spécifiques en gaz naturel pour le séchage et la cuisson ne sont que de 840 à 1050 kJ/kg de produits cuits (briques) [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Applicabilité

La récupération de la chaleur résiduelle provenant des fours et notamment de leurs zones de refroidissement sous forme d'air chaud peut, en principe, être appliquée à tous les secteurs de la céramique pour chauffer les séchoirs. Il est à noter, toutefois, que cette récupération de la chaleur résiduelle des fours ne s'applique que si la chaleur résiduelle doit servir en même temps à un autre procédé.

L'exemple spécifique évoqué ci-dessus (en Allemagne, seules quelques rares usines emploient ce procédé) ne peut être généralisé, notamment en ce qui concerne l'utilisation de la chaleur résiduelle du brûleur de postcombustion étant donné que bien souvent, les effluents gazeux d'un brûleur de postcombustion sont trop froids pour permettre une récupération efficace de l'énergie.

Aspects économiques

- réduction de la consommation d'énergie
- les coûts supplémentaires d'isolation des tuyaux doivent être pris en compte.

Eléments moteurs de la mise en œuvre

- économiser de l'argent en économisant de l'énergie
- réduction des émissions de CO₂.

Installations types et littérature de référence

JUWOE POROTON-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH, Allemagne, briqueterie [4, UBA, 2001], [1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.1.3 Centrale de cogénération/centrale combinée d'électricité et de chaleur

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Le fait d'employer des centrales de cogénération pour de la vapeur et de l'électricité, ou de centrales combinées d'électricité et de chaleur est utile, dans son principe, dans l'industrie céramique, en raison de la demande simultanée en chaleur et en courant électrique. La caractéristique essentielle d'une centrale de cogénération est son moteur d'entraînement. Les moteurs pouvant convenir sont les moteurs à gaz Otto, les moteurs diesel et les turbines à gaz avec utilisation de la chaleur résiduelle.

La figure 4.2 illustre un exemple d'utilisation de la chaleur résiduelle d'une centrale combinée d'électricité et de chaleur pour produire de l'air chaud [4, UBA, 2001]. Cet air chaud sert au séchoir à briques. Il faut au séchoir une certaine quantité d'air frais, en complément de la chaleur résiduelle provenant du four. On prélève généralement cet air dans le bâtiment du séchoir, pour exploiter les composants de chaleur à fort rayonnement du four et du séchoir. On le mélange à la chaleur résiduelle provenant du four, devant le ventilateur d'alimentation du séchoir. Dans le tuyau d'aspiration destiné à l'air frais, on installe un réchauffeur d'air pour maintenir le préchauffage de l'air frais. Cet échangeur de chaleur est chauffé par l'eau de refroidissement des moteurs d'entraînement. Les effluents gazeux ont une température de 450 à 550 °C, selon le type de moteur. Ils sont introduits dans la chambre de mélange et utilisés directement dans le séchoir. Tout déficit de chaleur est comblé par un brûleur à

gaz supplémentaire. Si le séchoir n'a pas besoin de chaleur, les effluents gazeux non refroidis en provenance des moteurs sont évacués directement par une cheminée.

Dryer	Séchoir
Supplementary firing	Cuisson complémentaire
Gas engine flue-gas	Effluents gazeux du moteur à gaz
Mixing chamber	Chambre de mélange
Catalyst	Catalyseur
Sound insulator	Isolant phonique
c. 450 °C	env. 450 °C
c. 90 °C	env. 90 °C
c. 80 °C	env. 80 °C
Kiln flue-gas c. 300 °C	Effluents gazeux du four env. 300 °C
Cogeneration gas engine	Moteur à gaz de cogénération
Fresh air c. 40 °C	Air frais env. 40 °C
Emergency cooler circuit	Circuit de refroidissement de secours
Kilns	Fours

Figure 4.2 : Vue schématique de la génération d'air chaud au moyen d'un moteur à gaz de cogénération

Dans certains cas, avant d'être introduits dans la chambre de mélange, les effluents gazeux peuvent également passer par une chaudière pour produire de la vapeur qui servira lors de la phase d'extrusion.

Effets inter-milieux

Les moteurs d'entraînement peuvent provoquer des émissions supplémentaires dans l'atmosphère au niveau du site ainsi qu'une augmentation du bruit.

Applicabilité

La chaleur produite par les centrales mixtes thermiques et électriques peut être utilisée lors du procédé de séchage par atomisation, notamment pour la fabrication des carreaux pour sols et murs et des céramiques domestiques. Cette chaleur peut également servir aux séchoirs s'il leur faut un complément de chaleur, notamment dans des briqueteries, comme le montre la figure 4.2.

Aspects économiques

L'économie de cette application dépend en grande partie des conditions existantes et du secteur céramique concerné. Pour des motifs économiques, la cogénération s'utilise de manière limitée en Europe, par exemple dans la fabrication de briques et de tuiles. Néanmoins, cette technique mérite d'être prise en considération, surtout lors de la conception d'une nouvelle installation.

Une solution moins coûteuse à l'utilisation de la chaleur résiduelle décrite ci-dessus consiste à introduire la chaleur directement dans le séchoir (voir section 4.1.2).

Elément moteur de la mise en œuvre

Mise en œuvre d'une technologie de production économe en énergie.

Installations types et littérature de référence

[4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.1.4 Remplacement du fioul lourd et des combustibles solides par des combustibles peu polluants

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Le passage du procédé de cuisson du fioul lourd (HFO) ou des combustibles solides aux combustibles gazeux (le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) mais aussi le gaz naturel liquéfié (GNL)) procure une meilleure efficacité de cuisson et la quasi élimination des émissions de suie dans de nombreux procédés. Les combustibles solides produisent généralement de fines cendres, de sorte qu'une réduction des émissions de particules lors de la combustion d'un gaz permet, dans certains cas, d'éviter le recours à de coûteux et énergivores procédés de dépoussiérage. Les brûleurs à gaz se prêtent à des systèmes de commande automatique sophistiqués, ce qui permet d'économiser sur les combustibles et de réduire les déchets de produits cuits, afin de réduire la consommation spécifique en énergie. L'utilisation de fioul EL au lieu du fioul lourd ou des combustibles solides permet également de réduire les émissions de suie des procédés de cuisson.

Le fait d'utiliser du gaz naturel, du GPL, du GNL ou du fioul EL au lieu du fioul lourd ou des combustibles solides permet de réduire les émissions de SO₂ liées à la source d'énergie utilisée, leur teneur en soufre étant plus faible (voir tableau 3.3). Par ailleurs, le gaz naturel, le GPL et le GNL ayant des rapports hydrogène/carbone plus élevés que ceux des fiouls ou des combustibles solides, ils produisent moins de dioxyde de carbone (environ 25 % de CO₂ en moins dans le cas du gaz naturel) pour une production de chaleur équivalente.

Les combustibles alternatifs/secondaires d'origine organique, comme la farine de viande et d'os ou les biocombustibles, et d'origine non organique, comme les huiles usagées ou les solvants, utilisés par exemple pour la fabrication des granulats d'argile expansée (voir section 2.3.4.2.2), permettent de réduire la quantité de combustibles fossiles primaires et les émissions de CO₂ associées.

En outre, l'utilisation de combustibles peu polluants peut faire intervenir d'autres technologies économes en énergie - par exemple, la cogénération avec des turbines à gaz - dans le procédé de fabrication. Des économies supplémentaires d'énergie (électrique) peuvent également être réalisées grâce au fait que certains combustibles liquides (en particulier le fioul lourd) doivent être chauffés pour pouvoir être pompés.

Effets inter-milieux

D'autres aspects sécuritaires - en particulier les risques d'explosion - doivent être pris en considération, notamment à propos du GPL et du GNL.

Données opérationnelles

Elles dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier.

Applicabilité

En principe, un changement de combustible peut être appliqué à tous les secteurs de la céramique, mais il convient de noter que la nature du combustible peut également influencer sur les caractéristiques esthétiques du produit final. Ainsi, certaines teintes extrêmement prisées sur le marché ne s'obtiennent que par (co)incinération de charbon ou de poussières de charbon dans des fours. Par exemple, certains types de briques de parement de couleur spéciale ne peuvent être produits par la seule combustion du gaz naturel, et il faut en outre injecter de la poussière de charbon pour allumer le four (on utilise à cet effet des fours de type Hoffmann). Ainsi, un changement de combustible n'est pas toujours possible, et va dépendre du type de produit à fabriquer.

Dans le procédé de fabrication des granulats d'argile expansée, la plupart des poussières canalisées sont recyclées, ce qui permet de réduire l'impact d'un changement de combustible sur la production de cendres.

Aspects économiques

Le passage du fioul lourd ou des combustibles solides aux combustibles peu polluants est susceptible d'engendrer des coûts d'investissement considérables, notamment si l'usine ne dispose pas d'une alimentation en gaz naturel. Ici, ce sont non seulement les coûts des combustibles, mais également les coûts supplémentaires liés au transport du GPL, du GNL et du fioul EL qu'il faut prendre en compte.

Eléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- moins de fluctuations dans la qualité des produits
- réduction des émissions de CO₂.

Installations types et littérature de référence

[1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006]

4.1.5 Modification des pâtes céramiques

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Une conception évoluée dans la composition de la pâte permet de réduire les temps de séchage et de cuisson nécessaires et par conséquent, motive l'utilisation de fours à cuisson rapide et à faible volume, tels que les fours de type à rouleaux et à dalles mobiles. Par conséquent, le fait de modifier la composition de la pâte facilite le séchage et la cuisson, notamment dans le secteur des carreaux pour sols et murs et dans celui des tuyaux en grès. Cela peut engendrer une réduction de la consommation d'énergie dans ces domaines. Une démarche similaire est à l'étude pour les produits céramiques à parois plus épaisses.

Les additifs porogènes s'utilisent principalement pour diminuer la conductivité thermique des blocs d'argile, en créant des micropores. La masse thermique de ces blocs d'argile s'en trouve réduite et, un autre avantage d'utiliser ces additifs porogènes, la cuisson nécessite moins d'énergie. Une nouvelle conception des produits céramiques peut également réduire la masse - p. ex. des carreaux plus minces, des briques multiperforées, des blocs ou des tuyaux à parois plus épaisses. Lorsqu'elles sont techniquement réalisables, ces modifications permettent de réduire la consommation d'énergie et les émissions.

Le fait de réduire la quantité d'eau de mélange nécessaire permet d'économiser sur l'énergie de séchage. La quantité d'eau de mélange nécessaire dépend principalement de la composition minérale de l'argile et de sa granulométrie. Les additifs peu gourmands en eau consistent en des produits humides dotés d'agents inorganiques séquestrants ou complexants. Ils permettent de réduire la tension de surface interfaciale de l'eau de mélange et d'immobiliser les cations libres gênants. Les besoins en eau de mélange du procédé de préparation des matières premières sont réduits et la plasticité obtenue est équivalente, voire meilleure. Cela permet, en outre, de minimiser les besoins en énergie du procédé de séchage.

Le fait de régler automatiquement l'incorporation d'eau en fonction de la plasticité requise pour la matière et d'utiliser, dans la mesure du possible, de la vapeur d'eau et non de l'eau pour le mélange, permet de réduire la quantité d'eau (d'environ 3 %), d'énergie thermique (d'environ 90 kWh/t de produit) et d'électricité (d'environ 1,5 kWh/t de produit).

Dans tous les cas, l'ajout de vapeur dans la partie extrusion facilite la sortie de l'argile extrudée et permet d'obtenir exactement la teneur en humidité requise pour l'argile.

Une réduction significative de la température de cuisson et une diminution du temps de séjour sont obtenus grâce à l'adjonction d'auxiliaires de frittage extrêmement efficaces, comme les additifs alcalinoterreux et fortement basiques, ainsi que d'agents vitrifiants. Toutefois, l'emploi de ces additifs n'est possible que dans certains cas bien précis et pas pour tous les produits céramiques. Des réductions de la température de cuisson finale pouvant aller jusqu'à 50 K sont possibles. Afin d'éviter des arrêts de production et une dégradation de la qualité, il faudrait normalement procéder à des essais préliminaires avant d'utiliser ces additifs à grande échelle.

Effets inter-milieux

L'utilisation d'agents organiques porogènes peut entraîner une augmentation des émissions de substances organiques et de CO dans l'atmosphère. L'emploi d'auxiliaires de frittage fait augmenter les émissions de CO₂ du fait de leur forte teneur en carbonates alcalins.

Données opérationnelles

Elles dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier.

Applicabilité et aspects économiques

L'utilisation d'auxiliaires de frittage et d'additifs porogènes contenant de l'énergie permet de faire des économies d'énergie, notamment dans la fabrication de briques. Comme décrit ci-dessus, il est possible d'utiliser des matières brutes secondaires à contenu énergétique, par exemple de la sciure de bois, du polystyrène (styropore) ou les agents liants pour papier, est possible dans la fabrication de blocs d'argile. Ces agents porogènes peuvent fournir jusqu'à 25 % de l'énergie totale sous forme d'énergie secondaire dans la production des briques de remplissage. L'utilisation d'agents porogènes dans la production de briques de parement est exceptionnelle, en raison de leur effet sur les propriétés techniques des briques (ex. couleur, densité) ;

Cela dit, en règle générale, la forme et la composition des produits dépendent largement des exigences du marché et par conséquent, la modification des pâtes céramiques n'est possible que dans un cadre limité et certainement pas pour tous les produits céramiques.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- augmentation de la production du produit
- amélioration de la qualité du produit.

Installations types et littérature de référence

JUWOE POROTON-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH, Allemagne, briqueterie [4, UBA, 2001], [1, BMLFUW, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.2 Emissions de poussières (particules)

Cette section décrit des techniques et des mesures destinées à empêcher les émissions diffuses (principalement les sections 4.2.1 et 4.2.2) et les émissions canalisées (principalement la section 4.2.3). A ce sujet, le lecteur trouvera des informations utiles dans le BREF sur les émissions de stockage et dans le BREF sur le traitement des eaux et gaz usés courants et leurs systèmes de management dans l'industrie chimique.

4.2.1 Mesures pour les opérations génératrices de poussières

Description

Sont présentées ici plusieurs mesures qui peuvent être appliquées individuellement ou en combinaison :

- capotage des opérations génératrices de poussières, comme le broyage, le criblage et le mélange
- utilisation de broyeurs-mélangeurs à meules couverts et aérés
- filtration de l'air déplacé pendant le chargement des mélangeurs ou des doseurs
- silos de stockage d'une capacité suffisante, indicateurs de niveau dotés d'interrupteurs de coupure et de filtres pour traiter l'air poussiéreux déplacé pendant les opérations de remplissage
- convoyeurs à bandes couverts pour les matières premières contenant éventuellement de la poussière
- préférence pour un procédé de circulation pour les systèmes de convoyage pneumatique
- manutention des matériaux dans des systèmes fermés maintenus sous pression négative et dépoussiérage de l'air d'aspiration
- réduction des fuites d'air et des points de déversement, achèvement de l'installation.

Bénéfices environnementaux réalisés

- réduction des émissions de poussières principalement diffuses
- une réduction du bruit est également possible grâce au capotage des machines.

Effets inter-milieux

- les systèmes de convoyage pneumatique à circulation d'air sont susceptibles d'entraîner une augmentation des émissions de bruit et de la consommation d'énergie électrique
- les opérations d'entretien peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles

Elles dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier. Dans tous les cas, des opérations régulières de maintenance et de réparation permettent d'assurer que des fuites dans les tuyaux d'évacuation des effluents gazeux, les silos de stockage et les unités de préparation ou que des enceintes endommagées seront rapidement réparées.

Applicabilité

Ces mesures peuvent être appliquées dans tous les secteurs de l'industrie céramique, dans des installations anciennes ou récentes, mais lorsqu'il s'agit d'argiles humides, il n'est pas forcément nécessaire d'appliquer la totalité des mesures susmentionnées.

Aspects économiques

Ceux-ci dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier. Pour les installations plus anciennes, le capotage des équipements peut nécessiter un plan de mise en œuvre à moyen ou long terme.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- exigences d'hygiène et de sécurité sur le lieu de travail

- économie de matières premières.

Installations types et littérature de référence

[1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.2.2 Mesures pour les zones de stockage en vrac

Description

Afin de réduire les émissions dans l'air de nature essentiellement diffuse au niveau des lieux de stockage en vrac des matières premières minérales poussiéreuses, on peut protéger ces lieux de stockage en vrac au moyen d'écrans, de murs ou d'une clôture formant un mur végétal (barrières artificielles ou naturelles contre le vent pour la protection des cases de stockage à ciel ouvert contre le vent).

S'il est impossible d'empêcher les émissions de poussières aux points de rejet des sites de stockage, il est toutefois possible de les réduire en faisant correspondre la hauteur de rejet à la hauteur variable de l'empilement, si possible automatiquement, ou en réduisant la vitesse de déchargement. En outre, les lieux peuvent être maintenus humides - notamment dans des zones sèches - au moyen de pulvérisateurs (si la source ponctuelle de poussière est localement limitée, un système de pulvérisation d'eau peut être installé) et peuvent être nettoyés par des camions de nettoyage.

Pour empêcher la formation de poussières diffuses lors des opérations de dépoussiérage, on peut utiliser des systèmes d'aspiration. Il est facile d'équiper de nouveaux bâtiments de systèmes d'aspiration fixes, tandis que pour les bâtiments existants, il est normalement plus adapté de prévoir des systèmes mobiles et des raccords flexibles.

Bénéfices environnementaux réalisés

Réduction des émissions de poussières principalement diffuses.

Effets inter-milieux

- la consommation d'eau augmente lorsque les lieux sont maintenus humides
- la consommation d'énergie augmente en raison de l'utilisation de systèmes d'aspiration
- les opérations d'entretien peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles

Elles dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier.

Applicabilité

Ces mesures peuvent être appliquées dans tous les secteurs de l'industrie céramique, dans des installations anciennes ou récentes, mais lorsqu'il s'agit d'argiles humides, il n'est pas forcément nécessaire d'appliquer la totalité des mesures susmentionnées. Par ailleurs, comme il faut parfois employer des matières premières sèches lors du mélange pour obtenir les propriétés souhaitées, le mouillage n'est applicable que dans une certaine mesure.

Aspects économiques

Ils dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier. A ce sujet, voir également le tableau 4.7.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- exigences d'hygiène et de sécurité sur le lieu de travail.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.2.3 Systèmes de séparation/filtration

Cette section décrit quelques techniques destinées exclusivement au dépoussiérage. On notera, par ailleurs, que la plupart des techniques d'épuration des effluents gazeux décrites dans la section 4.3.4 conviennent non seulement à l'élimination de SO_x, HF et HCl, mais également à celle des poussières.

4.2.3.1 Séparateurs centrifuges

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans un séparateur centrifuge, les particules de poussières à éliminer d'un courant d'effluents gazeux sont repoussées contre la paroi extérieure de l'unité par l'action centrifuge puis s'évacuent par un orifice situé au fond de l'unité. Des forces centrifuges peuvent être développées par un écoulement gazeux dirigé en spirale descendante à travers un récipient cylindrique (séparateur cyclonique) ou grâce à une turbine rotative installée dans l'unité (séparateur centrifuge mécanique).

Effets inter-milieux

- le fonctionnement d'un séparateur centrifuge constitue une importante source de bruit
- la consommation d'électricité peut augmenter si on utilise une turbine
- les opérations de maintenance peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles

Les séparateurs centrifuges sont plus efficaces pour des charges de polluants élevées, à condition que le dispositif ne se bloque pas.

Applicabilité

Le rendement d'épuration d'un séparateur centrifuge est généralement trop faible pour réduire les émissions de poussières à un niveau conforme à la réglementation sur la pollution atmosphérique dans l'industrie de la céramique. Par conséquent, ce séparateur ne peut servir que de pré-séparateur et fait souvent suite à des opérations de séchage par atomisation, de concassage et de broyage.

Aspects économiques

La collecte et la récupération des poussières séparées permettent de réduire la consommation de matières premières.

Élément moteur de la mise en œuvre

Economie de matières premières.

Installations types et littérature de référence

[1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.2.3.2 Filtres à manches

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans un filtre à manches, les effluents gazeux passent à travers une manche de dépoussiérage, de sorte que les particules de poussière se déposent sur la surface du filtre sous forme de gâteau. Les installations munies de filtres à manches permettent d'obtenir une bonne rétention des particules, généralement supérieure à 98 % et pouvant aller jusqu'à 99 % en fonction de la granulométrie.

La figure 4.3 ci-après présente une vue schématique d'un filtre à manches avec régénération par impulsion de pression [4, UBA, 2001]. La régénération s'opère par une impulsion de pression exercée sur la partie gazeuse épurée du filtre à manches.

Compressed-air tank	Réservoir à air comprimé
Blowpipe	Buse de soufflage
Venturi tube	Tube de Venturi
Filter bag	Manche de dépoussiérage
Filter bag during cleaning	Manche de dépoussiérage pendant l'épuration
Wire supporting cage	Cage de support grillagée
Raw gas inlet	Entrée des gaz bruts
Hopper	Trémie
Dust lock	Suppression des poussières

Figure 4.3 : Vue schématique d'un filtre à manches avec régénération par impulsion de pression

Effets inter-milieux

- le fonctionnement d'un filtre à manches, notamment avec régénération par impulsion de pression, peut provoquer des émissions de bruit et peut également entraîner une augmentation de la consommation d'énergie en raison de la forte chute de pression d'un tel filtre
- les opérations d'entretien peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles et aspects économiques

Les filtres à manches sont disponibles dans différents tissus, parmi lesquels certains présentant une bonne résistance aux acides ou aux alcalis. Les tissus synthétiques modernes comprennent des matières capables de supporter des températures très élevées, mais un filtre à manches ne peut fonctionner à une température trop élevée. Des exemples des tissus de filtre les plus répandus sont présentés au tableau 4.2, qui indique les propriétés et les prix relatifs de ceux-ci [3, CERAME-UNIE, 2003]. En particulier, si un filtre à manches est employé au sein d'un système d'épuration des effluents gazeux par voie sèche destiné à épurer les effluents gazeux des fours (voir section 4.3.4.3), il faut que le filtre et les porte-manches résistent à la corrosion, en cas de condensation. Des exemples types de données concernant le fonctionnement d'un filtre en tissu sont recensés au tableau 4.3, et la figure 4.4 présente des exemples de coûts d'investissement pour des installations de filtration, à l'exclusion de l'installation et des manches de dépoussiérage [3, CERAME-UNIE, 2003]. [23, TWG Ceramics, 2005].

Matériau des manches de dépoussiérage	Résistance à la température (en °C)	Prix (en EUR/m ²)
Coton	80	<5
Polypropylène	100	5
Polyester	150	10 - 12
Nomex (aramide m)	220	25
PTFE (Téflon)	280	100 - 120

Tableau 4.2 : Exemples de résistance à une température et prix des filtres à manches

Charge en poussière des gaz bruts	jusqu'à 200 g/m ³
Charge en poussière des gaz épurés	1 - 20 g/m ³
Température de fonctionnement	jusqu'à 250 °C
Coût d'exploitation	0,03 - 0,1 EUR/t

Tableau 4.3 : Exemples de données opérationnelles pour un dépoussiérage par filtres à manches

Investment cost (€)	Coût d'investissement (en €)
Filtering Surface (m ²)	Surface de filtration (en m ²)

Figure 4.4 : Exemples des coûts d'investissement compris dans les coûts annuels des installations de filtrage, à l'exclusion de l'installation et des manches de dépoussiérage

Il faut que les filtres à manches auto-nettoyants soient suffisamment grands pour fonctionner avec une charge spécifique de la surface de filtration inférieure à 2 Nm³/(m² x minute), pour que des concentrations de gaz épurés comprises dans une plage de 1 - 20 g/m³ soient rapportées [1, BMLFUW, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005]. La collecte, la récupération et la réutilisation des poussières séparées permettent de réduire la consommation en matières premières.

Un filtre à manches ne peut fonctionner à des températures trop élevées et - notamment dans le cas des effluents gazeux humides - à des températures proches du point de rosée. En effet, le filtre peut se colmater et il est alors difficile de le sécher et de le nettoyer à nouveau, en raison des réactions entre l'eau et le CaO qui forment une croûte dure. Cela a pour effet d'augmenter de manière considérable les coûts d'entretien et d'électricité, ainsi que les délais de production.

En principe, les coûts d'exploitation des filtres à manches sont étroitement liés à la quantité d'électricité nécessaire pour compenser la perte de charge, comme indiqué ci-dessus.

A ce sujet, voir aussi le tableau 4.7.

Applicabilité

Les filtres à manches destinés au dépoussiérage des effluents gazeux peuvent en principe être appliqués dans tous les secteurs de l'industrie céramique, notamment pour les opérations génératrices de poussières (pour le dépoussiérage des silos de stockage des matières premières sèches, dans la préparation des matières premières sèches et notamment le séchage par atomisation, dans le façonnage par voie sèche et dans les procédés d'usinage ou de broyage à sec). Il est parfois utile d'associer ces filtres à des pré-filtres cycloniques (voir section 4.2.3.1).

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- possible économie de matières premières par rapport à d'autres types de filtre (par ex. un dépoussiéreur humide).

Installations types et littérature de référence

Tondach Gleinstaetten AG, usine de briques et de tuiles, Autriche, [1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.2.3.3 Filtres lamellaires frittésDescription et bénéfices environnementaux réalisés

Les principaux éléments de ce filtre sont les couches filtrantes rigides, qui sont montées sous forme d'éléments compacts dans le système de filtration. Les éléments filtrants sont fabriqués en polyéthylène fritté recouvert de PTFE, ce qui leur confère une dureté et des caractéristiques de résistance à l'eau. Les principaux avantages de ces couches filtrantes modernes sont leur très grande efficacité de dépoussiérage des effluents gazeux associée à une faible perte de charge, ainsi que leur forte résistance à l'usure par abrasion provoquée notamment par les particules de céramique brute.

La figure suivante présente une vue schématique d'un filtre lamellaire fritté rigide de ce type, qui se nettoie grâce à un système auto-nettoyant à impulsion par jet [4, UBA, 2001].

Clean gas outlet	Sortie des gaz épurés
Sound insulation	Isolation phonique
Electric motor	Moteur électrique
Compressed-air tank	Réservoir à air comprimé
Radial fan	Ventilateur radial
Blowpipe for cleaning purpose of filter elements	Buse de soufflage destinée au nettoyage des éléments filtrants
Filter element	Élément filtrant
Raw gas inlet	Entrée des gaz bruts
Venturi tube	Tube Venturi
Dust storage reservoir	Réservoir de stockage des poussières

Figure 4.5 : Vue schématique d'un filtre lamellaire fritté rigide

Effets inter-milieux

- le fonctionnement d'un filtre lamellaire fritté doté de systèmes auto-nettoyants par impulsion par jet peut provoquer des émissions de bruit et une consommation supplémentaire d'énergie
- les opérations de maintenance peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles

Grâce à ces éléments filtrants, on peut obtenir des efficacités d'épuration pouvant aller jusqu'à 99,99 pour cent avec des concentrations de gaz épuré inférieures à 1 mg/m^3 , ce qui permet de réintroduire le gaz épuré dans l'atelier [4, UBA, 2001].

Applicabilité

L'utilisation de filtres lamellaires frittés permet de séparer les poussières humides engendrées, par exemple, par l'émaillage par pulvérisation. Ce système de filtration permet une réinjection directe des particules d'émail séparées des effluents gazeux de la cabine de pulvérisation. Une zone de repos, située en amont, garantit que les poussières du système sont relativement sèches. Idéalement, les particules d'émail séparées s'élèvent sous forme de poudre dans le système de filtration.

Aspects économiques

En règle générale, les coûts d'investissement et d'exploitation des filtres lamellaires frittés sont nettement plus élevés que ceux des filtres à manches, mais la possibilité de réintroduire les effluents gazeux épurés dans la zone de travail permet d'économiser les coûts énergétiques qui seraient engagés s'il fallait réchauffer des débits volumétriques importants d'air frais pour assurer des températures correctes sur le lieu de travail.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- exigences d'hygiène et de sécurité sur le lieu de travail
- économie de matières premières
- économie d'énergie.

Installations types et littérature de référence

Oesterreichische Sanitaer-, Keramik- und Porzellan-Industrie AG, fabrique de sanitaires, Autriche [1, BMLFUW, 2003], [4, UBA, 2001], [32, TWG Ceramics, 2006]

4.2.3.4 Dépoussiéreurs humides

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans un dépoussiéreur humide, on élimine la poussière des flux d'effluents gazeux en mettant le flux gazeux étroitement en contact avec un liquide d'épuration (généralement de l'eau), afin que les particules de poussières soient retenues dans l'eau et puissent être évacuées par rinçage. Les dépoussiéreurs humides se divisent en plusieurs types, selon leur modèle et leur principe de fonctionnement (par exemple, du type venturi).

Effets inter-milieux

Dans la technique du dépoussiérage par voie humide, étant donné que les polluants sont transférés de l'air dans l'eau, il est essentiel d'avoir une seconde installation pour l'épuration du déchet humide produit (suspension), ce qui peut également entraîner une consommation supplémentaire d'énergie.

Données opérationnelles

Des concentrations de gaz épurés dans une plage de 20 à 50 mg/m³ ont été rapportées [1, BMLFUW, 2003], [4, UBA, 2001]. A ce sujet, voir aussi le tableau 3.33.

Applicabilité

Les dépoussiéreurs humides conviennent plus particulièrement à la réduction des émissions de poussières humides ou mouillées dues notamment aux procédés de séchage par atomisation, s'ils sont associés à des cyclones. Ils présentent un intérêt particulier si l'eau de rinçage peut être réutilisée.

Aspects économiques

En ce qui concerne les coûts d'exploitation, il convient de prendre en compte le liquide de lavage ainsi que l'épuration des eaux de process. En règle générale, une petite unité qui contrôle un flux d'effluents gazeux à faible concentration sera beaucoup plus chère (par débit unitaire) qu'une grande unité chargée d'épurer une charge élevée en polluants.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

Oesterreichische Sanitaer-, Keramik- und Porzellan-Industrie AG, fabrique de sanitaires, Autriche [1, BMLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998], [17, Burkart, 2004], [20, CERAME-UNIE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006]

4.2.3.5 Électrofiltres (EF)

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans un électrofiltre, les effluents gazeux traversent une chambre contenant deux électrodes. Une tension élevée (jusqu'à 100 kV) est appliquée à la première électrode, ce qui provoque l'ionisation des effluents gazeux. Les ions générés adhèrent aux particules de poussière contenues dans les effluents gazeux, ces particules se chargeant alors électriquement. Les forces électrostatiques éloignent les particules de poussière chargées de la première électrode et les attirent vers la seconde, sur laquelle elles se déposent. Les particules de poussières sont ainsi éliminées du flux d'effluents gazeux.

Effets inter-milieux

- il existe des risques d'explosion, notamment si on utilise des systèmes d'EF par voie sèche
- la consommation d'énergie augmente en raison du fonctionnement de l'EF (mais une perte de charge plus faible que celle des autres systèmes de filtre est susceptible de réduire la consommation d'énergie électrique des ventilateurs d'exhaure)
- les opérations d'entretien peuvent donner lieu à des déchets supplémentaires.

Données opérationnelles et aspects économiques

Le tableau 4.5 ci-après recense des données types d'exploitation et de coûts pour des électrofiltres [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [28, Schorcht, 2005].

Volume des gaz	jusqu'à 100000 m ³ /h
Vitesse des gaz	0,5 - 3 m/s
Teneur en poussière des gaz bruts	jusqu'à 100 g/m ³
Teneur en poussière des gaz épurés	5 - 50 mg/m ³
Température de fonctionnement	jusqu'à 450 °C
Tension	10 - 100 kV
Consommation d'énergie	0,05 - 2 kWh/1000 m ³
Coût d'investissement	1 - 3 millions EUR
Coût d'exploitation	0,1 - 0,2 EUR/t

Tableau 4.4 : Données opérationnelles et de coût pour des électrofiltres

A ce sujet, voir aussi le tableau 4.7.

Lorsqu'on utilise un électrofiltre, il faut tenir compte des coûts de maintenance qui sont relativement élevés.

On déclare des concentrations en poussière de gaz épurés inférieures à 50 mg/m³ comme atteignables, dans le cadre d'un procédé de fabrication de granulats d'argile expansée dans un four rotatif équipé d'un électrofiltre (voir section 3.3.4.1) [17, Burkart, 2004].

Applicabilité

Les électrofiltres sont utilisés par l'industrie céramique, principalement dans la fabrication de granulats d'argile expansée, à l'arrière de fours rotatifs et d'unités de broyage à sec, où de forts débits volumétriques doivent être traités à des températures élevées et avec une fiabilité de fonctionnement relativement élevée.

Eléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- économie de matières premières.

Installations types et littérature de référence

Usine Hallerndorf-Pautzfeld, Allemagne (fabrique de granulats d'argile expansée), Usine Lamstedt, Allemagne (fabrique de granulats d'argile expansée), [26, UBA, 2005], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [28, Schorcht, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005]

4.3 Composés gazeux

4.3.1 Réduction de l'apport de précurseurs de polluants

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Oxydes de soufre

- l'utilisation de matières premières et d'additifs à basse teneur en soufre permet de réduire de manière significative les émissions de SO_x
- dans le cas de matières premières riches en soufre, l'ajout d'additifs pâteux à basse teneur en soufre (par ex. le sable) ou d'argile à basse teneur en soufre permet de réduire les émissions de SO_x par effet de dilution
- l'utilisation de combustibles à basse teneur en soufre, tels que le gaz naturel ou le GPL, permet d'obtenir des réductions significatives des émissions de SO_x .

Oxydes d'azote

- la minimisation des composés azotés dans les matières premières et les additifs permet de réduire les émissions de NO_x .

Composés inorganiques chlorés

- l'utilisation de matières premières et d'additifs à basse teneur en chlore permet de réduire de manière significative les émissions de chlore.

Composés inorganiques fluorés

- l'utilisation de matières premières et d'additifs à basse teneur en fluor permet de réduire de manière significative les émissions de fluorure
- dans le cas de matières premières riches en fluor, l'ajout d'additifs pâteux à basse teneur en fluor (par ex. le sable) ou d'argile à basse teneur en fluor permet de réduire les émissions de fluorure par effet de dilution.

Composés organiques volatils (COV)

La minimisation des composés organiques dans les matières premières, les additifs, les agglomérants etc., permet de réduire les émissions de COV. Par exemple, c'est principalement lors de la fabrication de produits poreux qu'on ajoute des additifs organiques tels que la sciure de bois et le polystyrène au mélange de matières premières. Or, ces additifs organiques donnent lieu à des émissions de COV (à ce sujet, voir le tableau 4.3 concernant les valeurs de gaz bruts obtenues lors de la fabrication des briques, avec l'utilisation de différents agents porogènes). Il est possible, en principe, d'éviter la génération d'émissions de COV en passant à des additifs porogènes inorganiques, par exemple la perlite (matière volcanique vitreuse contenant de 3 à 4 % d'eau. Chauffée (de 800 à 1100 °C), cette matière se dilate, grâce aux bulles de vapeur qui se forment à l'intérieur, jusqu'à 15 à 20 fois son volume initial).

Effets inter-milieux

La minimisation des composés organiques dans les matières premières peut faire augmenter la consommation d'énergie du procédé de cuisson.

Données opérationnelles et applicabilité

La réduction de l'apport de précurseurs de polluants est une mesure privilégiée pour réduire les polluants dans les effluents gazeux d'un four, car elle résout le problème à la source, mais en réalité, certaines contraintes spécifiques peuvent rendre son application délicate. Par conséquent, l'utilisation de matières premières et d'additifs présentant de faibles teneurs en précurseurs de polluants peut théoriquement s'appliquer à tous les secteurs de l'industrie céramique. Toutefois, il faut toujours tenir compte de leur disponibilité et des éventuels problèmes de qualité des produits liés à tel ou tel cas (notamment en ce qui concerne la couleur, la résistance à la compression et la résistance au gel) et veiller à réaliser systématiquement des essais approfondis sur les mélanges de matières premières.

Ainsi, les additifs porogènes inorganiques engendrent des difficultés techniques, du fait que ces substances ont tendance à se dilater de manière trop brusque et trop marquée, ce qui rend le processus de formation de pores difficile à contrôler et fait baisser la qualité du produit. De ce fait, dans la pratique, le passage des additifs porogènes organiques à des additifs inorganiques n'est probablement pas possible. A l'heure actuelle, il existe bien en Flandres une installation qui utilise la perlite comme additif. Toutefois, il s'agit ici d'une forme de perlite déjà dilatée et broyée, qu'on utilise pour appauvrir une argile de Boom trop riche et non comme agent porogène.

Pour la fabrication des granulats d'argile expansée, la réduction des COV est impossible étant donné que ces derniers servent à la formation des pores.

Par ailleurs, la teneur en polluants des matières premières est un paramètre important pour les émissions de polluants lors de la cuisson, mais ce n'est pas toujours le facteur déterminant. En effet, ces émissions dépendent de plusieurs critères, et notamment des paramètres d'exploitation du procédé de cuisson. Ainsi, une diminution de 50 % de la teneur en polluants des matières premières n'engendre pas systématiquement une réduction identique de l'émission de polluants, l'expérience ayant montré qu'il existait également une corrélation entre la teneur en fluor de l'argile et la concentration des émissions de HF.

En ce qui concerne le problème du soufre, il faut mentionner que l'implantation habituelle de l'argilière à proximité de l'installation limite le choix des matières premières à basse teneur en soufre (voir également « Aspects économiques »).

Aspects économiques

Pour une entreprise qui possède une carrière d'argile à haute teneur en soufre, l'utilisation ou l'adjonction de matières argileuses à basse teneur en soufre suppose que l'entreprise dispose au départ d'une réserve de matière argileuse extraite ailleurs par un tiers. Cela entraîne un coût supplémentaire conséquent qui est lié, d'une part, aux frais supplémentaires de transport (estimés en 1998 à 0,05 EUR/tonne/km) et d'autre part, à l'augmentation des frais d'extraction (estimés en 1998 à 2,5 EUR/tonne) et qui doit être réglé à un tiers, par rapport au coût de l'argile issue de la propre carrière de l'entreprise [2, VITO, 2003]. La minimisation des composés organiques dans les matières premières peut également faire augmenter les coûts, en raison des distances de transport éventuellement plus longues entre les fournisseurs extérieurs et l'installation.

Des mesures impliquant l'ajout d'additifs à basse teneur en soufre et/ou d'additifs pâteux d'argile contenant du calcium (voir aussi section 4.3.2) peuvent engendrer des coûts d'investissement substantiels (jusqu'à 850000 EUR), p. ex. pour agrandir la capacité de stockage ou pour modifier les machines utilisées dans la préparation des matières premières, le façonnage et le séchage. Ces mesures peuvent également engendrer des coûts d'exploitation et des coûts matériels supplémentaires.

Eléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- éviter de coûteuses techniques de réduction curatives.

Installations types et littérature de référence

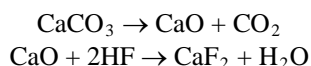
[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics 2005]

4.3.2 Ajout d'additifs riches en calcium

Description et bénéfices environnementaux réalisés

L'ajout de calcaire fin ou de craie aux pâtes céramiques a un effet de dilution, mais ces additifs riches en calcium réagissent également, à des températures relativement faibles qui vont de 700 à 850 °C, avec des matières premières contenant du fluorure et du chlorure, ainsi qu'avec les oxydes de soufre formés lors de la cuisson à partir des matières premières soufrées, pour retenir le fluor, le chlore et le soufre à l'intérieur de la pâte cuite.

Cette réaction chimique sert « fixer » le fluorure grâce à la formation d'un fluorure de calcium stable et permet de réduire de manière significative les émissions de HF.



Une réaction similaire sert aussi à « fixer » le chlorure et les SO_x à l'intérieur de la pâte céramique, comme indiqué ci-dessus, et contribue également à faire baisser de manière importante les émissions de HCl et de SO_x.

Toutefois, la concentration en HF, HCl et SO_x dans les effluents gazeux n'est pas nécessairement liée à la teneur en CaO de la matière première, l'expérience ayant montré que même la présence de carbonates fins ou de CaO dans les produits argileux au cours de la cuisson pouvait n'avoir qu'un effet limité, voire nul, sur les émissions de HF, de HCl et de SO₂/SO₃. Cela s'explique principalement par les hautes températures de cuisson qui règnent à l'intérieur du four et qui provoquent la décomposition du CaSO₄, du CaCl₂ et du CaF₂. A une température d'environ 850 °C, le CaF₂ commence à se décomposer. A haute température (plus de 900 °C), le CaO va également réagir avec les silicates pour former des silicates de calcium, ce qui réduit la quantité de CaO disponible.

Effets inter-milieux

L'ajout d'additifs riches en calcium peut faire augmenter la quantité d'énergie nécessaire à la cuisson à cause, d'une part, des réactions endothermiques qui ont lieu dans le four et d'autre part, de l'allongement des temps de cuisson nécessaires. En outre, l'ajout d'additifs riches en calcium fait augmenter les émissions de CO₂.

Données opérationnelles et applicabilité

Les additifs riches en calcium peuvent engendrer une diminution de 10 à 75 % des émissions de fluor (en fonction de la matière première et des températures maximales de cuisson), mais leur ajout peut influencer sur la qualité du produit final ; par conséquent, dans la pratique, l'application de cette mesure n'est pas sans limites [4, UBA, 2001].

Le principal secteur d'application est l'industrie de la brique, à condition que les propriétés techniques du produit final soient pleinement respectées ; dans l'industrie réfractaire, cette mesure n'est pas répandue. Les aspects de la qualité sur lesquels peut influencer un ajout de chaux sont les suivants :

- la couleur : l'augmentation de l'apport en chaux entraîne un changement de couleur, vers des teintes plus claires (plus jaunes). Une légère décoloration est admise dans la fabrication des briques pour murs intérieurs, mais cette décoloration peut engendrer des problèmes de vente pour la fabrication des briques de parement et il est donc impossible d'utiliser ces additifs dans toutes les masses en brique. L'ajout de Fe_2O_3 peut compenser en partie ce jaunissement
- la concentration des sulfates solubles dans l'eau : celle-ci augmente au fur et à mesure qu'augmentent les quantités de CaCO_3 ajouté. Les sulfates solubles dans l'eau sont en partie responsables des phénomènes d'efflorescence qui apparaissent sur les maçonneries
- la résistance à la compression : l'ajout de carbonate de calcium peut avoir un léger effet positif ainsi qu'un léger effet négatif sur la résistance à la compression
- comportement au retrait : l'ajout de craie a un effet relativement imprévisible sur le comportement au retrait du produit au séchage et à la cuisson
- absorption d'eau : l'absorption d'eau spontanée augmente au fur et à mesure qu'augmentent les quantités de CaCO_3 ajouté, ce qui fait monter le taux de saturation. Cela entraîne une réduction de la résistance au gel de la brique et un risque accru d'apparition d'efflorescences. Ces effets sont plus facilement tolérés sur des murs intérieurs que sur des briques de parement
- les granulats d'argile expansée doivent avoir une teneur maximale en CaO de 3 %, sous peine d'une réduction importante de la résistance des granulats ; par ailleurs, au-dessus de 5 %, la dilatation devient médiocre en raison d'un fluxage excessif [2, VITO, 2003].

Aspects économiques

L'augmentation des émissions de CO_2 induite par l'utilisation d'additifs riches en calcium peut faire augmenter les coûts en raison des obligations légales (par ex. échange des quotas d'émission). Par ailleurs, les changements du comportement au retrait des produits céramiques peuvent avoir une incidence sur les traitements mécaniques au cours de la fabrication.

Des mesures consistant à ajouter des additifs à basse teneur en soufre et/ou des additifs pâteux d'une argile contenant du calcium (voir aussi section 4.3.1) peuvent engendrer des coûts d'investissement substantiels (jusqu'à 850000 EUR), p. ex. pour agrandir la capacité de stockage ou pour modifier les machines utilisées dans la préparation des matières premières, le façonnage et le séchage. Ces mesures peuvent également engendrer des coûts d'exploitation supplémentaires (coûts matériels).

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- éviter de coûteuses techniques de réduction curatives.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics 2005]

4.3.3 Optimisation des procédés

4.3.3.1 Optimisation de la courbe de chauffage

Description, bénéfices environnementaux réalisés et données opérationnelles

La vitesse d'échauffement ainsi que le niveau de la température de cuisson peuvent influencer sur les émissions de SO_x et de HF :

- la réduction de la vitesse d'échauffement dans la plage de température la plus basse (jusqu'à 400 °C) favorise la résorption du HF avec la formation de CaF_2 , ce qui fait diminuer les émissions de HF. Un effet similaire peut s'appliquer aux émissions de SO_x . Ces dernières se forment généralement lors de l'oxydation de la pyrite et/ou de la dissociation du sulfate de calcium présent dans la pâte céramique
- le fait d'augmenter la vitesse d'échauffement dans une plage de températures comprise entre 400 °C et la température de cuisson permet d'atteindre plus rapidement la température de frittage, ce qui a pour effet de limiter le dégagement d'émissions par diffusion et par conséquent, de diminuer les émissions
- le niveau de la température de cuisson a un effet sur la décomposition des sulfates. Plus la température de cuisson est basse, moins il y a de décomposition et par conséquent, moins il y a d'émissions de SO_x . Cette réduction de la température de cuisson peut s'obtenir par ajout de fondants au mélange de matières premières
- des cycles de cuisson plus rapides permettent généralement de réduire les émissions de fluorure. Les caractéristiques de la matière première influent sur les rejets de fluor, mais quel que soit le produit céramique, le temps de cuisson passé au-dessus d'une température de 800 °C est crucial
- le contrôle des niveaux d'oxygène dans les procédés de cuisson permet de maximiser l'efficacité de la combustion.

La figure ci-après montre les plages de température d'un exemple de courbe de température pour le rejet de polluants lors de la cuisson de briques [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Stack	Cheminée
Preheating	Préchauffage
Firing	Cuisson
Cooling	Refroidissement
Firing curve	Courbe de cuisson
Tunnel kiln	Four tunnel
Dried bricks	Briques séchées
Bricks	Briques
Flue-gas	Effluents gazeux
Carbonisation gas	Gaz de carbonisation
Sulphur	Soufre
Fluorine	Fluor
Excess heat for drying	Chaleur résiduelle pour le séchage

Figure 4.6 : Plages de température d'un exemple de courbe de température pour le rejet de polluants lors de la cuisson de briques

Effets inter-milieus

Sans objet.

Applicabilité et aspects économiques

L'optimisation de la courbe de chauffage ou du contrôle de procédé peut être appliquée dans tous les secteurs de l'industrie céramique, mais on notera que dans la pratique, les courbes de chauffage de l'industrie de transformation de l'argile sont optimisées selon des critères de qualité des produits et de consommation énergétique. Par conséquent, les courbes de chauffage ne peuvent être modifiées que si les propriétés techniques du produit final le permettent et lorsqu'il s'agit de modifier les courbes de chauffage aux motifs des émissions, il convient de tenir compte des coûts additionnels.

Eléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- éviter de coûteuses techniques de réduction curatives
- exploitation des fours d'une manière économe en énergie.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.3.2 Réduction des niveaux de vapeur d'eau dans les gaz de four

Description, bénéfices environnementaux réalisés et données opérationnelles

La réduction des taux de vapeur d'eau dans les gaz de four s'accompagne généralement d'une réduction des taux d'émission du fluorure, étant donné que le mécanisme de base du rejet de fluor par les minéraux argileux est la pyrohydrolyse. Cette réaction se produit à des températures supérieures ou égales à 800 °C.

Effets inter-milieux, applicabilité et aspects économiques

Des essais en laboratoire ont révélé qu'une réduction de la teneur en eau de l'atmosphère du four entraînait bien une réduction des émissions de HF comme des émissions de SO_x. Dans la pratique, réduire la teneur en eau de l'atmosphère du four serait une opération difficile à réaliser au plan technique, l'eau étant produite par la combustion des combustibles fossiles utilisés pour chauffer le four. Cette production d'eau ne peut être évitée qu'en chauffant le four indirectement, par exemple avec des brûleurs à gaz et à tubes radiants [5, InfoMil, 2003] ou à l'électricité, mais il faudrait alors modifier fondamentalement la conception du four, ce qui entraînerait une consommation accrue d'énergie.

En principe, dans l'ensemble de l'Europe, l'alimentation des fours par des combustibles solides est la seule solution qui soit économiquement viable pour les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée. Dans ces secteurs, un chauffage des fours à l'électricité ou par voie indirecte n'est donc pas réellement applicable (le chauffage électrique ne s'utilise que pour de brefs passages de produits spéciaux et dans le cas de produits réfractaires). En revanche, dans les secteurs des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques, une réduction des taux de vapeur d'eau dans les gaz de four obtenue grâce à un chauffage électrique des fours (les fours à chauffage électrique s'utilisent parfois dans la fabrication de certaines céramiques techniques) ou indirectement, grâce à des brûleurs à tube radiant [5, InfoMil, 2003] (les fours intermittents ou les petits fours à rouleaux peuvent en principe être équipés de ces brûleurs pour une production à plus petite échelle), possède un potentiel d'application plus réaliste.

Elément moteur de la mise en œuvre

- obligations légales
- éviter de coûteuses techniques de réduction curatives.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [5, InfoMil, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.3.3 Combustion interne des gaz de carbonisation

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Les émissions de COV qui se produisent dans la zone de chauffage du four par suite de la décomposition et d'une combustion incomplète des composants organiques du mélange de matières premières (et qui sont appelées gaz de carbonisation), peuvent être ensuite brûlées dans le four, à condition que celui-ci ait été spécialement modifié. On obtient une combustion interne en renvoyant les gaz de carbonisation de la zone de chauffage du four vers la zone de cuisson, où ils vont ensuite continuer de brûler en raison des températures élevées qui règnent dans cette zone. Pour ce faire, il faut que la zone du four où se produisent ces émissions de COV (appelée zone de carbonisation) soit séparée du reste du four. Cette séparation peut se faire en installant une ou plusieurs portes coulissantes dans le four ou au moyen d'un système d'extraction spécial pour les gaz de carbonisation. Cette technique permet de réduire de manière significative, non seulement les émissions de COV, mais également les émissions de CO. La figure ci-après présente une vue schématique de la combustion interne des gaz de carbonisation [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Flue-gas stack	Cheminée des effluents gazeux
Carbonisation gas return	Renvoi des gaz de carbonisation
High-velocity burners	Brûleurs à haute vitesse
Heating	Chauffage
Carbonisation	Carbonisation
Preheating	Préchauffage
Firing	Cuisson
Recovery	Récupération
Injection burners	Brûleurs à injection

Figure 4.7 : Vue schématique de la combustion interne des gaz de carbonisation

Effets inter-milieux

La combustion des gaz de carbonisation à l'intérieur du four peut faire augmenter la consommation globale d'énergie, notamment s'il faut une cuisson supplémentaire avec des brûleurs (à haute impulsion) pour brûler les gaz de carbonisation issus de la zone de chauffage.

Données opérationnelles et applicabilité

Les systèmes de combustion interne des gaz de carbonisation sont déjà utilisés depuis un certain temps en Allemagne, et notamment par quelques dizaines de briqueteries. Ces systèmes permettent de réduire de manière significative les émissions de COV, mais ils ont l'inconvénient pratique d'entraver le fonctionnement du four, le rendant ainsi difficile à contrôler. Le grippage des portes, en l'occurrence, est un problème connu pour les systèmes qui fonctionnent avec des portes coulissantes au niveau du four. L'interférence provoquée par la postcombustion thermique à l'intérieur du four, lorsqu'un four tunnel est employé comme simple échangeur de chaleur à contre-courant, engendre souvent des difficultés dans le mode d'exploitation du four ou des frais d'exploitation plus élevés. C'est probablement la raison pour laquelle les systèmes de postcombustion externe des gaz de carbonisation connaissent un succès grandissant depuis quelques années, notamment pour les nouvelles installations.

Cette technique ne peut s'appliquer à la fabrication des granulats d'argile expansée, le souci étant ici que le séchage et la cuisson se déroulent en même temps, ce qui produit des gaz contenant de fortes concentrations d'eau.

L'utilisation de cette technique permet d'obtenir des valeurs de C total des gaz épurés d'environ 15 mg de C total/m³, si les valeurs en gaz brut sont de 250 mg de C total/m³ [4, UBA, 2001].

Aspects économiques

En raison de la complexité des techniques de cuisson et de commande, la combustion interne des gaz de carbonisation est un système relativement coûteux en termes de coût de maintenance.

A ce sujet, voir tableau 4.7.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- obligations légales
- éviter de coûteuses techniques de réduction curatives.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.3.4 Brûleurs bas-NO_xDescription, bénéfices environnementaux réalisés et données opérationnelles

Les émissions d'oxydes d'azote résultent de la cuisson de produits céramiques, par exemple de produits réfractaires, réalisée à des températures supérieures à 1300 °C. Ces émissions de NO_x peuvent être minimisées grâce à l'utilisation de brûleurs spéciaux bas-NO_x. Ces brûleurs permettent de réduire la température de la flamme et donc de réduire les NO_x d'origine thermique et (dans une certaine mesure) combustible. La réduction des NO_x s'effectue par un apport d'air de dilution permettant d'abaisser la température de la flamme ou grâce à un fonctionnement pulsé des brûleurs.

Effets inter-milieux

Sans objet.

Applicabilité

L'applicabilité et l'efficacité des brûleurs bas-NO_x dépendent de plusieurs facteurs tels que la température finale de cuisson. Dans certains cas, un manque d'efficacité a été signalé à des températures supérieures à 1400 °C. A ce sujet, le lecteur trouvera des compléments d'information utiles dans le BREF relatif à l'industrie verrière, où sont aussi mentionnés les brûleurs à faible taux d'émission de NO_x. Les exigences de qualité imposées sur le produit final peuvent également contribuer à limiter l'utilisation de brûleurs bas-NO_x [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[1, BMLFUW, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.4 Installations de sorption (adsorbateurs, absorbeurs)

A ce sujet, des informations utiles sont présentées dans le BREF relatif au traitement des eaux et gaz résiduels courants et leurs systèmes de management dans l'industrie chimique.

4.3.4.1 Adsorbateurs à lit à garnissage de type cascade

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans un adsorbateur à lit à garnissage de type cascade, la réaction entre l'adsorbant, qui est généralement du carbonate de calcium (CaCO_3 , calcaire) et les polluants (principalement HF, SO_x et HCl) des effluents gazeux se produit généralement dans une chambre dans laquelle l'adsorbant descend par gravité et à travers laquelle les effluents gazeux passent à contre-courant ou en écoulement transversal. Afin d'assurer un temps de réaction et une zone de contact suffisants, des déflecteurs sont prévus dans cette chambre. Ces déflecteurs retardent la vitesse de descente de l'adsorbant et assurent une circulation et une répartition efficaces des effluents gazeux au sein de l'unité. Le carbonate de calcium utilisé est récupéré au fond de l'installation. Ces adsorbateurs sont capables de supporter des gaz à des températures pouvant aller jusqu'à 500 °C sans refroidissement préalable et par conséquent, ils sont extrêmement efficaces pour réduire les émissions de HF, de SO_x et de HCl issues des effluents gazeux du four. La figure ci-après présente une illustration d'un adsorbateur à écoulement transversal [4, UBA, 2001].

Figure 4.8 : Illustration d'un adsorbateur de type cascade à écoulement transversal

Le carbonate de calcium s'utilise sous forme de granulés qui ont généralement une granulométrie de 4 à 6 mm et qui doivent correspondre à certaines spécifications en termes de dimension, de composition et de porosité pour obtenir une efficacité maximale d'épuration. Outre le carbonate de calcium ordinaire, des types modifiés de carbonate de calcium, composés de mélanges carbonate de calcium/hydroxyde de calcium ($\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$) peuvent être utilisés comme adsorbants. Grâce à leur plus grande porosité et à leur plus forte teneur en hydroxyde de calcium, ils possèdent davantage d'affinité pour les gaz acides.

L'adsorption de HF, SO_x et HCl ayant lieu principalement à l'extérieur des granulés de carbonate de calcium, l'efficacité d'adsorption de ces granulés est assez faible. Pour augmenter l'efficacité d'adsorption lorsqu'on utilise du carbonate de calcium non modifié, on peut employer une technique d'exfoliation. Dans cette technique, l'enveloppe externe molle des granulés utilisés, qui est constituée de fluorure de calcium, de sulfite de calcium, de sulfate de calcium ou de chlorure de calcium, s'élimine par voie mécanique. On peut alors réutiliser le granulé restant comme adsorbant, à condition qu'il soit de dimension suffisante, ainsi moins de déchets (se présentant sous forme de calcaire saturé exfolié) sont produits.

Dans le cas des granulés modifiés, leur meilleure affinité pour les gaz acides passe par des qualités de surface améliorées ; il est donc impossible de les exfolier pour les réutiliser, comme on peut le faire pour un carbonate de calcium non modifié.

La figure ci-après présente un schéma de procédé d'un adsorbent à lit à garnissage de type cascade doté d'un tambour d'exfoliation. L'agent de sorption exfolié est réinjecté automatiquement dans le silo de stockage. La quantité de déchets est réduite pratiquement de 50 % grâce à cette mesure [4, UBA, 2001].

Silo truck	Camion silo
Supply pipe	Conduite d'alimentation
Feedback pipe	Conduite de recirculation
Fluorine cascade adsorber	Adsorbent de fluor de type cascade
Filling ratio detector	Détecteur de taux de remplissage
Pneumatic change-over damper	Registre à commutation pneumatique
Raw gas pipe	Conduite de gaz brut
Silo exhaust air	Evacuation d'air du silo
Manual reducing damper	Registre à réduction manuelle
Conveyor	Convoyeur
Peeling drum	Tambour d'exfoliation
Flue-gas fan	Ventilateur d'effluents gazeux
Silo	Silo
Star feeder lock	Distributeur rotatif
Fan	Ventilateur
Flue-gas stack	Cheminée des effluents gazeux
Tunnel kiln	Four tunnel
Compressed-air device	Dispositif à air comprimé

Figure 4.9 : Schéma de procédé d'un adsorbent à lit à garnissage de type cascade avec tambour d'exfoliation

Le granulat de calcaire, saturé en polluants, est acheminé dans le tambour d'exfoliation par un convoyeur à vis. La couche extérieure, saturée par les polluants, est éliminée par frottement et évacuée en même temps que les petits granulats d'un diamètre particulaire inférieur à 2,5 mm. Ces matières polluées sont évacuées par des camions à silo. La surface du granulat d'un diamètre particulaire supérieur à 2,5 mm est à nouveau réactive. Le granulat recyclé est réintroduit dans le silo de stockage de l'adsorbent par un distributeur rotatif et une conduite de recirculation. L'adsorbent, le tambour d'exfoliation et la conduite de recirculation forment un circuit fermé. L'exfoliation et la recirculation s'opèrent de façon automatique et continue.

Effets inter-milieux

- consommation élevée d'adsorbants
- quantité importante de déchets (due à un dosage excédentaire relativement élevé de l'adsorbant)
- les granulés de carbonate de calcium réagissent avec les composants acides des effluents gazeux pour former du CO_2
- consommation accrue d'énergie due au fonctionnement de l'adsorbeur (notamment pour compenser la perte de charge)
- une augmentation des émissions de poussières résultant de l'augmentation de la charge en poussières liée aux granulés de carbonate de calcium est possible, notamment si on utilise des tambours d'exfoliation
- émissions possibles de bruit.

Données opérationnelles

Les granulés de carbonate de calcium non modifié, et de préférence des carbonates de calcium de type plus mou, conviennent plus particulièrement à l'élimination du HF et du SO_3 . Pour ces composés, les granulés ont une efficacité d'épuration supérieure à 90 % (jusqu'à 99 %) et 80 %, respectivement. Le carbonate de calcium ordinaire, en revanche, n'est pas particulièrement adapté à l'élimination du SO_2 , ce dernier étant moins réactif que HF et SO_3 ; son efficacité d'épuration est de l'ordre de 20 %. Pour le HCl, l'efficacité d'épuration du carbonate de calcium non modifié est d'environ 50 % [2, VITO, 2003], [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Le carbonate de calcium modifié convient mieux à l'élimination du SO_2 et donne également des efficacités d'épuration légèrement supérieures pour l'élimination du HF et du SO_3 . Grâce au carbonate de calcium modifié, on peut obtenir des efficacités d'épuration pouvant aller jusqu'à 99 % pour le HF, jusqu'à 85 % pour le SO_3 , de 30 à 85 % pour le SO_2 pour une concentration en gaz brut maximale de $1500 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ et une efficacité supérieure à 50 % pour le HCl. L'efficacité d'épuration de ces systèmes peut atteindre 100 % pour la rétention des particules en suspension (voir aussi la section 4.3.6) [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005].

Des effluents gazeux d'une teneur approximative de $2500 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ peuvent, dans certaines conditions - par exemple avec quatre adsorbants (de type à lit à garnissage à contre-courant et avec du carbonate de calcium modifié) placés en aval les uns des autres - être suffisamment filtrés pour permettre l'obtention de valeurs de gaz épurés inférieures à $500 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$. Par ailleurs, une efficacité d'épuration des gaz bruts à forte charge de 85 % peut être obtenue pour le SO_2 [4, UBA, 2001], tandis qu'avec un seul adsorbant, l'efficacité d'épuration pour le SO_2 tombe à environ 30 % [2, VITO, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005].

A ce sujet, voir également le tableau 3.2 relatif à la répartition des rejets de chlorure, le tableau 3.6, le tableau 3.7, le tableau 3.8 et le tableau 3.9 concernant les émissions des procédés de fabrication des briques et tuiles et le tableau 3.43, concernant les émissions d'un procédé de fabrication d'appareils sanitaires utilisant des systèmes d'adsorbant à lit à garnissage [2, VITO, 2003].

Applicabilité

Cette technique peut être appliquée à plusieurs secteurs de l'industrie céramique, mais on notera la quantité d'espace occupée par le système, ainsi qu'un certain manque de souplesse vis-à-vis des commandes et de l'utilisation d'autres adsorbants. D'autres considérations doivent également être prises en compte, notamment les concentrations de HF et SO_x dans les gaz bruts, la gamme des produits argileux, le fonctionnement du four, la dimension du four, la cadence de production du four, la température de combustion maximale requise, le volume et la température des effluents gazeux, la charge résultante totale en poussières de l'adsorbant, les besoins de filtration de poussières, la possibilité de réutiliser, recycler ou mettre en décharge de grandes quantités de déchets issus des adsorbants, la disponibilité de pastilles de calcaire adaptées, l'augmentation de la demande en électricité et l'impact total sur l'environnement.

Aspects économiques

A ce sujet, voir le tableau 4.7.

De plus faibles quantités de calcaire saturé exfolié peuvent être ajoutées lors de la fabrication des blocs d'argile et des briques de parement, mais il faut tenir compte du fait que la teneur en sulfate de calcium du calcaire saturé peut faire apparaître des efflorescences sur les briques. L'utilisation de ce calcaire saturé dans l'industrie du ciment, du béton et de l'asphalte est également possible. Si sa réutilisation est impossible, il faut également tenir compte des coûts d'élimination.

Elément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

Wienerberger Ziegelindustrie AG, usine de fabrication de briques de parement, Rotenturm, Autriche, [1, MBLFUW, 2003], Erlus Baustoffwerke AG, usine de fabrication de tuiles, Neufahrn, Allemagne [4, UBA, 2001], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.4.2 Systèmes d'adsorption modulaires

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Le procédé le plus largement utilisé dans la séparation des composés fluorés inorganiques gazeux est celui de la sorption par voie sèche, au moyen de modules en nid d'abeille en hydroxyde de calcium, qui s'intègrent dans des ensembles appelés systèmes d'adsorption modulaires. Dans ce procédé, les effluents gazeux passent à travers un simple réacteur en acier dépourvu d'éléments mobiles. Ce réacteur abrite plusieurs couches de modules d'adsorption alvéolaires remplis d'une chaux éteinte (hydroxyde de calcium) qui transforme chimiquement le HF contenu dans les effluents gazeux en fluorure de calcium (CaF_2) au moment où ils traversent les modules. La durée de vie de ces modules est fonction de la durée d'exploitation de l'installation, du débit volumétrique des effluents gazeux et de la concentration en fluor dans les gaz bruts. Les modules sont répartis dans des étagères, ce qui permet de réduire le temps de remplacement des modules et facilite leur manutention. Les modules saturés sont remplacés par des modules neufs.

La figure ci-après montre une vue schématique d'une unité de sorption par voie sèche équipée de modules en nid d'abeille en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [4, UBA, 2001].

Raw gas inlet	Entrée des gaz bruts
Adsorber module	Module d'adsorption
Support rack	Etagère
Clean gas outlet	Sortie des gaz épurés

Figure 4.10 : Vue schématique d'un système d'adsorption modulaire alvéolaire

Effets inter-milieux

- consommation relativement élevée d'adsorbants
- quantité importante de déchets (les modules saturés doivent être éliminés)
- possibilité d'une consommation accrue d'énergie due au fonctionnement de l'adsorbent (notamment pour compenser la perte de charge dans le cas des effluents gazeux ayant des teneurs en poussières plus élevées).

Données opérationnelles et applicabilité

Ce système est simple et robuste sur le plan technique, du fait qu'il est dépourvu d'éléments mobiles et possède une faible perte de charge. Il est particulièrement efficace pour l'épuration de faibles débits d'effluents gazeux ($<18000 \text{ m}^3/\text{h}$) et lorsque les concentrations des composés inorganiques autres que HF (SO_2 , SO_3 , HCl) sont faibles. C'est pourquoi ce type de système s'utilise principalement dans l'industrie des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs, des appareils sanitaires et des céramiques techniques. Par ailleurs, les capillaires ayant tendance à se boucher en présence de concentrations de poussière plus élevées, ce système n'est pas vraiment adapté au dépoussiérage.

A ce sujet, voir le tableau 3.41, où sont recensées les concentrations des gaz bruts et épurés issus d'un procédé de fabrication de produit sanitaires et où un système en nid d'abeille d'adsorption modulaire est appliqué pour l'épuration des effluents gazeux.

Aspects économiques

A ce sujet, voir le tableau 4.7. Outre le prix des modules d'adsorption neufs, il convient de prendre en compte le prix de l'élimination des modules saturés, puisqu'il est impossible de les réutiliser.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[1, MBLFUW, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.4.3 Epuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre (filtre à manches ou électrofiltre)

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans ce type d'épuration des effluents gazeux, l'adsorbant est injecté dans le flux des effluents gazeux sous forme sèche. Les composants acides (oxydes de soufre et composés inorganiques chlorés et fluorés) sont adsorbés dans un réacteur ou dans une zone de réaction qui peut être le conduit des effluents gazeux situé entre le four et le filtre et doté d'une longueur minimum donnée pour assurer le temps de contact nécessaire. Le filtre situé à l'arrière du réacteur (ou de la zone de réaction) élimine les sels de neutralisation produits et l'excédent d'adsorbant du flux des effluents gazeux. Pour ce faire, on utilise principalement un filtre à manches, car il permet d'établir un bon contact entre l'adsorbant et les contaminants gazeux. Le tissu des manches de dépoussiérage doit pouvoir résister à des conditions acides et alcalines, et sera défini également par la température des gaz à traiter (voir tableau 4.2). La figure ci-après montre une vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005].

Emergency stack	Cheminée de secours
Stack	Cheminée
Reagent feeder	Alimentation en réactif
Fan	Ventilateur
Bag filter	Filtre à manches
Reagent layer	Couche de réactif
Conveying without heating	Convoyage sans chauffage
Single-deck kiln	Four mono-étage
T < 200 °C	T < 200 °C

Figure 4.11 : Vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches

Les filtres à manches peuvent être remplacés par des électrofiltres utilisant le même système d'injection de réactif en poudre. Ces derniers offrent l'avantage de fonctionner à des températures de gaz plus élevées (nettement supérieures à 400 °C), ce qui évite d'avoir à refroidir les effluents gazeux et facilite la récupération d'énergie à partir des gaz épurés. En revanche, le contact entre l'adsorbant et le polluant n'est pas aussi satisfaisant que celui réalisé avec un filtre à manches. La figure ci-après montre une vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un électrofiltre [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005].

Emergency stack	Cheminée de secours
Reagent feeder	Alimentation en réactif
Stack	Cheminée
T < 450 °C	T < 450 °C
Single-deck kiln	Four mono-étage
Electrostatic precipitator	Électrofiltre
Waste	Déchets

Figure 4.12 : Vue schématique de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un électrofiltre

Une variante spéciale de l'épuration des effluents gazeux par voie sèche est l'épuration des effluents gazeux par voie semi-sèche avec un filtre, également appelée épuration des effluents gazeux par voie sèche activée. Elle diffère de la méthode sèche du fait qu'elle utilise une faible quantité d'eau. On « active » l'adsorbant en le mouillant légèrement avec de l'eau, ce qui permet d'augmenter sa réactivité et d'améliorer son efficacité d'épuration. Par ailleurs, la consommation en adsorbants est plus faible et la quantité de résidus est moindre. Les inconvénients de cette technique sont la probabilité d'apparition de problèmes de corrosion liés au taux d'humidité plus élevé des effluents gazeux, ainsi qu'une plus grande complexité des commandes [2, VITO, 2003].

Effets inter-milieus

- la consommation d'adsorbants produit des quantités importantes de déchets
- le recyclage des déchets peut poser problème en raison des effets négatifs du calcium sur la rhéologie des barbotines céramiques
- une consommation d'énergie électrique relativement élevée, liée à la perte de charge dans un filtre à manches, et une augmentation respective de la consommation d'énergie électrique due à l'utilisation d'un EF
- le bruit est susceptible d'augmenter si on utilise des systèmes pneumatiques de nettoyage de filtre
- les adsorbants contenant du carbonate réagissent avec les composants acides des effluents gazeux pour former du CO₂.

Données opérationnelles et applicabilité

Le système d'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre présente une certaine souplesse par rapport aux commandes et à l'utilisation d'adsorbants. L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂), l'oxyde de calcium (CaO) ou, plus récemment, le bicarbonate de sodium (NaHCO₃) qui est le plus adapté à l'élimination du SO₂, font partie des adsorbants pouvant être utilisés. Par ailleurs, il faut mentionner que les produits de réaction du bicarbonate de sodium sont constitués de sels solubles dans l'eau (le sulfate de sodium et le fluorure de sodium) et que par conséquent, ils ne peuvent être éliminés facilement par mise en décharge.

Pour les systèmes d'épuration équipés d'un filtre à manches, les difficultés peuvent apparaître à des températures très élevées, où le filtre est susceptible de commencer à brûler, et à des températures très basses, proches du point de rosée, où le filtre peut facilement se colmater. Un système d'épuration doté d'un électrofiltre présente l'avantage de pouvoir fonctionner à des températures élevées, dépassant aisément les 400 °C, ce qui évite d'avoir à refroidir les effluents gazeux avant de les épurer et facilite la récupération d'énergie à partir des gaz épurés.

Un système d'épuration des effluents gazeux par voie sèche, au moyen d'un filtre à manches, permet d'obtenir des concentrations de fluorure dans les effluents gazeux traités qui sont inférieures à 5 mg/m^3 et des concentrations de poussières en suspension qui sont comprises dans une plage de 2 à 20 mg/m^3 . L'efficacité d'épuration de ces systèmes varie de 90 % à 99 % pour la rétention de particules en suspension, de 92 à 95 % pour la rétention des fluorures, de 10 à 80 % pour le SO_2 , jusqu'à 90 % pour le SO_3 et jusqu'à 85 % pour le HCl, si on utilise de l'hydroxyde de calcium comme adsorbant [2, VITO, 2003], [10, Navarro, 1998], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics, 2005].

Outre une efficacité d'épuration d'environ 99 % pour les particules en suspension, on peut obtenir plus de 95 % pour la rétention du fluorure, de 98 à 99 % pour le SO_2 et le SO_3 ainsi que 89 % pour le HCl, si on utilise du bicarbonate de sodium comme adsorbant dans un système d'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches (voir section 4.3.6) [4, UBA, 2001].

Un système d'épuration doté d'un électrofiltre présente l'avantage de pouvoir fonctionner à des températures pouvant atteindre environ 450°C , ce qui évite d'avoir à refroidir les effluents gazeux avant de les épurer et facilite la récupération d'énergie à partir des gaz épurés. Des concentrations en poussières dans les gaz épurés comprises dans une plage de 5 à 50 mg/m^3 sont déclarées réalisables pour une épuration des effluents gazeux par voie sèche avec des électrofiltres (voir section 4.2.3.5).

Les systèmes d'épuration des effluents gazeux par voie sèche au moyen d'un filtre peuvent en principe être utilisés pour épurer les effluents gazeux des fours dans tous les secteurs de la céramique, mais il convient de prendre en considération les inconvénients qu'ils présentent - par rapport aux systèmes d'adsorption à lit à garnissage - en ce qui concerne les besoins plus importants en maintenance et les problèmes de durée de vie des manches de dépoussiérage (pour un système équipé d'un filtre à manches).

Aspects économiques

A ce sujet - sorption sèche au moyen d'un filtre à manches - voir le tableau 4.7.

- pour un système semi-sec, le coût d'investissement est généralement plus élevé que pour une unité totalement sèche
- le bicarbonate de sodium est plus cher qu'un adsorbant à base de calcium
- il faut tenir compte des coûts supplémentaires liés à l'élimination des adsorbants saturés qui ne peuvent être réutilisés.

Elément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [10, Navarro, 1998], [4, UBA, 2001], [17, Burkart, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [26, UBA, 2005], [32, TWG Ceramics 2006]

4.3.4.4 Epuration des effluents gazeux par voie humide

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans l'épuration des effluents gazeux par voie humide, on élimine les composants acides (oxydes de soufre, composés inorganiques chlorés et fluorés) des effluents gazeux en les plaçant étroitement au contact de l'eau. Ces composants passent alors du gaz à la phase aqueuse. L'ampleur de cette opération dépend de la solubilité des composants en question. Afin d'augmenter cette solubilité, on peut rajouter une base dans l'eau, par exemple du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), du carbonate de sodium (Na_2CO_3), de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de l'ammoniac (NH_3).

La figure ci-après présente l'illustration d'une unité de lavage des effluents gazeux par voie humide [2, VITO, 2003]. Une unité de ce type comporte une unité de préparation pour le liquide de lavage, une section de lavage, un séparateur solide-liquide et éventuellement une unité de traitement de l'eau et un bac de récupération. On peut utiliser des plaques ou un matériau de garnissage inerte (colonnes de garnissage) pour augmenter la zone de contact. Outre les colonnes de lavage, il existe également des laveurs à jet, des laveurs venturi et des laveurs rotatifs.

Preparation unit	Unité de préparation
Cleaned flue-gas	Effluents gazeux épurés
Scrubbing liquid	Liquide de lavage
Untreated flue-gases	Effluents gazeux non traités
Water and eliminated components	Eau et composants éliminés
Water purified	Eau épurée
Effluent	Effluent
Residue	Résidus

Figure 4.13 : Illustration d'une unité d'épuration des effluents gazeux par voie humide

Dans un système d'épuration par voie humide, les effluents gazeux sont refroidis avant d'être épurés. En outre, le procédé par voie humide nécessite une unité de neutralisation et une unité de séparation des solides.

Une variante spéciale de l'épuration des effluents gazeux par voie humide est l'épuration des effluents gazeux par voie semi-humide, qui permet, la quantité d'eau étant plus faible, que celle-ci s'évapore. Il se forme alors un résidu sec qui a réagi de manière très efficace et qui peut être séparé au moyen d'un filtre. Cette méthode nécessite des températures plus élevées des effluents gazeux, afin de maintenir des températures suffisamment élevées au niveau du filtre par suite des pertes d'énergie dues à l'évaporation. Les systèmes semi-humides présentent l'avantage de consommer moins d'adsorbants, de produire des quantités plus faibles de résidus et d'avoir de meilleures efficacités d'épuration, mais ils nécessitent des commandes plus complexes [2, VITO, 2003].

Effets inter-milieux

- une forte consommation d'eau
- la production d'eaux de process (dans une moindre mesure pour les systèmes semi-humides) nécessite le traitement de ces eaux de process
- une consommation d'électricité relativement élevée en raison de la perte de charge au sein des unités
- les adsorbants contenant du carbonate réagissent avec les composants acides des effluents gazeux pour former du CO_2 .

Données opérationnelles

Pour éliminer le HF, le HCl et les SO_x au moyen d'une épuration des effluents gazeux par voie humide, on utilise généralement de la chaux comme adsorbant. Ici, une solution d'hydroxyde de calcium (lait de chaux) ou une suspension de carbonate de calcium dans de l'eau est atomisée dans une colonne à pulvérisation. Comme déchet, il se forme généralement un plâtre légèrement impur. Des efficacités d'épuration de 99 % pour le HF, jusqu'à 98 % pour le SO_2 , de 95 % pour le SO_3 et jusqu'à 95 % pour le HCl sont réalisables [2, VITO, 2003], [4, UBA, 2001].

Du fluorure de sodium (NaF), du sulfite de sodium (Na_2SO_3) et du chlorure de sodium (NaCl) se forment si on utilise de la lessive de soude (caustique) comme agent de sorption dans une colonne à garnissage. Les déchets produits dans l'agent de lavage doivent être éliminés après l'évaporation. Lorsque la lessive de soude sert d'agent de lavage, les efficacités d'épuration réalisables sont de 98 % pour le HF, jusqu'à 98 % pour le SO_2 , de 96 % pour le SO_3 et jusqu'à 98 % pour le HCl [4, UBA, 2001].

Dans l'épuration des effluents gazeux par voie humide, un inconvénient éventuel est celui de la corrosion. Les gaz en sortie des tours de lavage sont saturés d'eau et peuvent provoquer de la corrosion lorsqu'ils refroidissent à des températures inférieures au point de rosée. En outre, ces gaz froids se diffusent moins facilement dans l'atmosphère et engendrent un panache d'humidité ; par conséquent, il est parfois recommandé de réchauffer les effluents gazeux.

Applicabilité

Les systèmes d'épuration des effluents gazeux par voie humide peuvent, en principe, être appliqués dans tous les secteurs de la céramique. Plus particulièrement dans les cas où de fortes concentrations en SO_2 sont présentes dans les effluents gazeux et où des installations de sorption par voie sèche ne permettent pas d'obtenir de faibles concentrations en gaz épurés, le recours à des procédés humides offre une alternative aux systèmes de sorption par voie sèche. Toutefois, dans la pratique, l'application des procédés humides est fortement limitée par l'ampleur leurs coûts d'investissement et de maintenance.

Plus particulièrement dans les cas où des concentrations élevées de polluants inorganiques sont émises simultanément, par exemple pour une teneur en SO_2 élevée, supérieure à 2500 mg/m^3 , les procédés humides offrent une alternative aux systèmes d'épuration par voie sèche.

Aspects économiques

A ce sujet, voir le tableau 4.7. Les cycles de vie éventuellement plus courts de ces systèmes, dus à la corrosion, doivent également être pris en compte.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

Usine Hallerndorf-Pautzfeld, Allemagne (fabrique de granulats d'argile expansée), [26, UBA, 2005], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.4.5 Filtres à charbon actif

Description, bénéfices environnementaux réalisés, données opérationnelles et applicabilité

Les filtres à charbon actif conviennent uniquement à l'épuration de faibles volumes d'effluents gazeux constitués de composés organiques volatils (COV) qui sont rejetés, par exemple, sous forme de produits de réaction volatils par le traitement thermique des résines utilisées comme liants.

Les particules et les gouttelettes doivent être éliminées du flux gazeux avant le filtre à charbon. Si certains composés organiques (par ex. le phénol et le naphthalène) sont retenus par le charbon actif, d'autres ne sont pas efficacement absorbés.

Les filtres à charbon actif s'appliquent principalement au procédé de fabrication des produits réfractaires.

Effets inter-milieux

- augmentation de la quantité de déchets, si le filtre à charbon actif doit être éliminé et ne peut être régénéré
- consommation électrique accrue due au fonctionnement du filtre à charbon actif.

Aspects économiques

Coûts élevés, notamment si les filtres à charbon actif doivent être éliminés et ne peuvent être régénérés.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.4.6 Laveurs biologiques

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Les produits de réaction volatils qui se dégagent au cours du traitement thermique des résines utilisées comme liants dans l'industrie réfractaire, dans la fabrication de certaines céramiques techniques et de certains abrasifs inorganiques, comprennent l'ammoniac, le formaldéhyde et le phénol. Ces produits peuvent être éliminés des effluents gazeux à l'aide de liquides de lavage spéciaux. L'utilisation d'un laveur biologique est une variante dans laquelle le milieu absorbant se régénère. La solubilité des polluants dans l'eau et une arrivée constante et continue dans le laveur biologique sont des conditions nécessaires.

Effets inter-milieux

- possibilité d'une augmentation de la consommation d'eau et de la production d'eaux de process
- consommation énergétique accrue due au fonctionnement du laveur biologique.

Applicabilité

Les laveurs biologiques peuvent être appliqués dans les procédés de fabrication de produits réfractaires, ainsi que dans la fabrication de certaines céramiques techniques et de certains abrasifs inorganiques.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[3, CERAME-UNIE, 2003], [14, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.5 Postcombustion

A ce sujet, le lecteur trouvera également des informations intéressantes dans le BREF sur les émissions de stockage et dans le BREF sur le traitement des effluents aqueux et gazeux et leurs systèmes de management dans l'industrie chimique.

4.3.5.1 Postcombustion thermique

Description et bénéfices environnementaux réalisés

L'incinération des gaz de carbonisation contenant des COV à l'extérieur du four peut être réalisée dans des thermoréacteurs. Ces derniers comportent deux ou trois chambres remplies d'éléments en céramique ou en SiO_2 dotés d'une haute capacité de stockage de la chaleur. Elle s'effectue de préférence dans des cas où les valeurs des gaz bruts sont supérieures à 100 - 150 mg COV/m³, selon les caractéristiques des gaz bruts (par ex. température, composition).

Les effluents gazeux contenant des COV traversent la première chambre et absorbent la chaleur stockée dans celle-ci. Lorsqu'ils quittent la première chambre et qu'ils pénètrent dans le compartiment d'incinération, ils sont déjà proches de la température d'incinération. Dans le compartiment d'incinération, ils sont encore chauffés jusqu'à 750 à 800 °C par des brûleurs, de sorte que les substances organiques sont pratiquement entièrement brûlées. Le CO qui se trouve dans les effluents gazeux subit en outre une oxydation supplémentaire pour former du CO_2 . On obtient en outre, à condition que la température soit d'au moins 800 °C et que le temps de séjour soit d'au moins 1,5 secondes, une destruction à 90 % de toutes les dioxines présentes ou formées.

Les gaz chauds épurés qui sortent du compartiment d'incinération traversent ensuite une deuxième chambre, dans laquelle ils cèdent à nouveau la majeure partie de leur chaleur. Les gaz ayant refroidi quittent la deuxième chambre et sont évacués par la cheminée. Au bout d'un certain temps, une fois que la première chambre a suffisamment refroidi et que la deuxième chambre est suffisamment chaude, le sens d'écoulement des gaz est inversé. La deuxième chambre chauffe alors les gaz non traités et la première chambre refroidit les gaz épurés.

Si le thermoréacteur comporte une troisième chambre, celle-ci sert à éviter les pics d'émission lors de l'inversion du sens d'écoulement des gaz. Une fois que le sens d'écoulement des gaz a été inversé, on fait passer de faibles volumes d'air de balayage à travers cette chambre pour s'assurer qu'aucun gaz non traité ne peut atteindre la cheminée.

La figure ci-après montre une vue schématique d'un système de postcombustion thermique situé dans un thermoréacteur (système à trois chambres) [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

Fuel	Combustible
1 Preheater (chamber 1)	1 Dispositif de préchauffage (chambre 1)
2 Clean gas cooling (chamber 2)	2 Refroidissement des gaz épurés (chambre 2)
3 Scavenging (chamber 3)	3 Balayage (chambre 3)
4 Firing chamber	4 Chambre de cuisson
5 Burner	5 Brûleur
Flue-gas	Effluents gazeux
Scavenging air	Air de balayage
Clean gas	Gaz épurés

Figure 4.14 : Vue schématique d'un système de postcombustion thermique situé dans un thermoréacteur (système à trois chambres)

La figure ci-dessous présente la conduction des effluents gazeux dans un système externe de postcombustion thermique [4, UBA, 2001].

Clean gas outlet	Sortie des gaz épurés
Hot gas to dryer	Gaz chauds vers le séchoir
Heat exchanger	Echangeur de chaleur
Fuel	Combustible
Thermal flue-gas cleaning	Epuration des effluents gazeux par voie thermique
Ware to be fired	Produits à cuire
Preheating zone	Zone de préchauffage
Firing zone	Zone de cuisson
Cooling zone	Zone de refroidissement
Air	Air

Figure 4.15 : Conduction des effluents gazeux dans un système externe de postcombustion thermique

Effets inter-milieu

- nécessité d'un supplément de combustible, au moins au démarrage du système et lorsque la concentration en COV est inférieure au seuil d'auto-inflammation
- possibilité d'émissions de NO_x supplémentaires.

Données opérationnelles et applicabilité

Si les concentrations en COV et en CO sont suffisamment élevées, l'incinération est pratiquement autotherme. Dans ce cas, il n'y a pas besoin d'énergie supplémentaire pour que le processus d'incinération se poursuive. Cette situation s'observe principalement dans la fabrication de briques hautement poreuses, où de grandes quantités de substances organiques porogènes sont ajoutées au mélange des matières premières.

L'usage des thermoréacteurs s'est largement répandu depuis quelques années dans l'industrie de transformation de l'argile, notamment dans la fabrication des blocs d'argile, où des substances organiques porogènes sont ajoutées au mélange des matières premières, ainsi que pour réduire les émissions de COV liées aux procédés de fabrication d'autres produits céramiques, par exemple les produits réfractaires, les céramiques techniques et certains abrasifs inorganiques. Ces systèmes présentent l'avantage, par rapport à des systèmes d'incinération internes, de ne pas entraver le fonctionnement normal du four et de permettre que le flux des effluents gazeux soit épuré dans sa totalité. Dans la fabrication des granulats d'argile expansée, l'inconvénient est que les gaz ont une forte teneur en eau.

Selon l'efficacité d'épuration requise, les thermoréacteurs sont installés en tant que systèmes à deux ou à trois chambres. Dans des systèmes à deux chambres, des efficacités d'épuration comprises entre 94 et 97 % peuvent être obtenues, les systèmes à trois chambres permettant, quant à eux, d'obtenir sans aucun problème des efficacités d'épuration de plus de 99 % [4, UBA, 2001].

A ce sujet, voir aussi le tableau 3.6 relatif aux émissions des procédés de fabrication de briques et le tableau 3.54 relatif aux émissions des procédés de fabrication des céramiques techniques (abrasifs inorganiques). Dans ces procédés de fabrication, des brûleurs de postcombustion thermique sont utilisés pour l'épuration des effluents gazeux.

Aspects économiques

A ce sujet, voir le tableau 4.7.

- pour permettre une économie de combustible, la postcombustion thermique des COV et du CO s'opère de préférence avec un échange de chaleur régénératif
- plus les concentrations en COV et en CO des gaz bruts sont faibles, plus il faut d'énergie supplémentaire pour maintenir le réacteur en fonctionnement et par conséquent, plus le coût est élevé.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales associées à des techniques de procédés énergétiquement efficaces.

Installations types et littérature de référence

Wienerberger Ziegelindustrie AG/Werk Hennersdorf, briqueterie, Autriche, [1, MBLFUW, 2003], [2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [4, UBA, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006]

4.3.5.2 Postcombustion catalytique

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Dans cette technique de réduction des COV, on oxyde les polluants organiques volatils en faisant passer les effluents gazeux sur une surface catalytique qui accélère la réaction d'oxydation. Le catalyseur abaisse la température d'oxydation des polluants organiques à des températures comprises entre 200 et 300 °C. On utilise principalement des catalyseurs comportant des mélanges d'oxydes métalliques ou de métaux nobles (par ex. Pd, Pt et Rh).

Effets inter-milieux

Les catalyseurs employés oxydent facilement le SO_2 pour former du SO_3 , qui est un composé plus toxique et plus corrosif.

Applicabilité

L'oxydation catalytique est difficile à appliquer dans l'industrie de transformation de l'argile, du fait que les catalyseurs utilisés sont rapidement contaminés par les impuretés présentes dans les effluents gazeux (par ex. les composés soufrés). Par conséquent, l'oxydation catalytique s'emploie essentiellement pour épurer les faibles volumes de effluents gazeux à forte teneur en C total, qui sont rejetés, par exemple, lors de la cuisson de produits céramiques réfractaires ou des céramiques techniques spéciales dans des fours de petite dimension, ou lors du séchage.

Élément moteur de la mise en œuvre

Obligations légales.

Installations types et littérature de référence

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.3.6 Exemples de données opérationnelles, efficacités, consommations et données sur les coûts pour différentes techniques d'épuration des effluents gazeux

Le tableau ci-après montre des exemples de données opérationnelles, efficacités, données sur les consommations et sur les coûts pour différentes techniques d'épuration des effluents gazeux [2, VITO, 2003] [30, TWG Ceramics, 2005] :

Technique		Adsorbeurs à lit de type cascade	Adsorbeurs à lit de type cascade	Adsorbeurs à lit de type cascade	Epuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre	Epuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre	Epuration des effluents gazeux par voie humide	Epuration des effluents gazeux par voie humide
Valeur d'émission			SO ₂ <1500 mg/Nm ³	SO ₂ ≥2500 mg/Nm ³				
Adsorbant		CaCO ₃	CaCO ₃ modifié	CaCO ₃ modifié	Ca(OH) ₂	NaHCO ₃	Eau/Ca(OH) ₂ ou CaCO ₃	Lessive de soude (caustique)
Efficacité d'épuration	HF	90 % (jusqu'à 99 %)	jusqu'à 99 %	jusqu'à 99 %	de 80 jusqu'à 96 %	> 95 %	92 - 99 %	98 %
	SO ₂	8 - 20 %	de 43 jusqu'à 85 %	30 - 43 %	de 7 jusqu'à 80 %	98 - 99 %	de 20 jusqu'à 98 %	80 - 98 %
	SO ₃	80 %	80 - 85 %	80 - 85 %	jusqu'à 90 %	98 - 99 %	92 - 95 %	94 - 96 %
	HCl	50 %	> 50 %	50 %	de 10 jusqu'à 85 %	89 %	de 50 jusqu'à 95 %	80 - 98 %
	Poussières	100 %	100 %	99 %	90 - 99 %	99 %		100%
Excès de dosage d'adsorbant ^A		2,5	2,5	2,5	1,35 - 2,00		1,01 - 2,00	
Consommation d'eau (m ³ /jour) ^B		0	0	0	0		86 - 240	
Consommation d'électricité (kWh/jour) ^B		641 - 864	864	864	1200 - 2880		2352 - 4824	
Coûts d'adsorbant (EUR/tonne)		59	99	99	104		30 - 100	
Coûts d'investissement (EUR 10 ³) ^{B,C}		228 - 278	692	692	766 - 1081		511 - 659	
^A On entend ici : le rapport entre la quantité d'adsorbant nécessaire en pratique pour obtenir l'efficacité d'épuration indiquée et la quantité d'adsorbant théoriquement requise (en fonction de la stoechiométrie de la réaction d'adsorption).								
^B Cette plage désigne les valeurs soumises pour quatre sociétés types.								
^C Installation et coûts supplémentaires.								

Tableau 4.5 : Paramètres techniques, efficacités, consommations et données sur les coûts pour des techniques d'épuration des effluents gazeux

Des efficacités de réduction résultant de mesures intégrées au procédé et de techniques curatives sont illustrées dans les deux tableaux ci-après. Les techniques curatives interviennent principalement sur la réduction du HF. Les mesures intégrées au procédé n'ont d'incidence que sur la réduction des SO_x. Ces exemples montrent également les efficacités de réduction liées à la teneur en soufre de l'argile [2, VITO, 2003] [30, TWG Ceramics, 2005].

Exemple	1	2	3	4
Technique	Epuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre	Adsorbant à lit de type cascade	Adsorbant à lit de type cascade	Adsorbant à lit de type cascade
Matière première	Argile à haute teneur en soufre	Argile à haute teneur en soufre	Argile à haute teneur en soufre	Argile à haute teneur en soufre
Valeur d'émission	$SO_x > 1500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x > 1500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x \geq 2500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x \geq 2500 \text{ mg/m}^3$
Mesures intégrées au procédé	Ajout de matières contenant peu de soufre et du calcium	Ajout de matières contenant peu de soufre et du calcium	Ajout de matières contenant peu de soufre et du calcium	Ajout de matières contenant peu de soufre et du calcium ; additifs riches en calcium
Adsorbant	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$	$CaCO_3$	$CaCO_3$
Efficacité de réduction	HF	jusqu'à 96 %	jusqu'à 96 %	jusqu'à 92 %
	SO_x	jusqu'à 7 %	jusqu'à 8 %	jusqu'à 20 %
	HCl	0 %	jusqu'à 18 %	jusqu'à 57 %
	Pous-sières	jusqu'à 92 %	jusqu'à 39 %	jusqu'à 80 %

Exemple	5	6	7	8
Technique	Epuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre	Adsorbant à lit de type cascade	Adsorbant à lit de type cascade	Adsorbant à lit de type cascade
Matière première	Argile à haute teneur en soufre	Argile à basse teneur en soufre	Argile à basse teneur en soufre	Argile à basse teneur en soufre
Valeur d'émission	$SO_x > 1500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x < 500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x < 500 \text{ mg/m}^3$	$SO_x < 500 \text{ mg/m}^3$
Mesures intégrées au procédé	-	-	-	-
Adsorbant	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$	$CaCO_3$	$CaCO_3$
Efficacité de réduction	HF	jusqu'à 95 %	jusqu'à 74 %	jusqu'à 99 %
	SO_x	jusqu'à 34 %	0 %	jusqu'à 76 %
	HCl	jusqu'à 83 %	0 %	jusqu'à 94 %
	Pous-sières	0 %	jusqu'à 37 %	jusqu'à 83 %

Tableau 4.6 : Efficacités de réduction en fonction de la teneur en soufre de la matière première

A ce sujet, voir le tableau 3.8 et le tableau 3.9 qui présentent les données opérationnelles et les concentrations des gaz bruts et épurés correspondantes des fours de fabrication des blocs d'argile et des briques de parement [32, TWG Ceramics, 2006].

Certains exemples de données sur les coûts relatifs à la réduction des émissions, telles que les poussières, les composés inorganiques gazeux et les composés organiques gazeux, obtenue au moyen de différentes techniques de réduction sont illustrés en terme de coûts d'investissement, d'entretien et de sorbant, ainsi que de coûts d'exploitation, au tableau 4.7. Toutefois, ces données ne peuvent servir à comparer directement les différentes techniques entre elles étant donné que le coût réel va dépendre de facteurs tels que le débit, le niveau de contrôle, les valeurs des gaz bruts, l'énergie etc. L'objectif est de présenter une vue globale du niveau d'investissement susceptible d'être associé à ces différentes techniques [3, CERAME-UNIE, 2003], [2, VITO, 2003], [4, UBA, 2001], [30, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006].

Système/type d'épuration	Champ d'application	Absorbant/adsorbant	Dimensions/débits courants dans l'industrie céramique (m ³ réel/h) ¹	Estimation brute de l'investissement (EUR)	Maintenance (EUR/an)	Coût du sorbant (EUR/tonne) (EUR/an)	Coût d'exploitation EUR/t
Réduction des poussières							
Filtre à manches / installation de filtres à manches	Zones complètes de l'installation, préparation, convoyage, stockage, zone de façonnage, lieux de transfert, etc.		de 900 à 70000	6000 - 150000 (selon la taille et le nombre de conduits)			0,03 - 0,1
Aspirateur central	Zones complètes de l'installation, préparation, convoyage, stockage, zone de façonnage, lieux de transfert, wagonnets de four etc.		de 900 à 1000	25000 - 65000 (selon le nombre de conduits/canalisationes)			
Système de nettoyage des wagonnets de four (différents modes d'exécution : buse fixe, buse mobile, levage et réglage du plateau)	Wagonnets de four		de 8000 à 30000	40000 – 200000 (selon la taille et le mode d'exécution)			
Électrofiltre	Traitement des poussières dans des flux d'effluents gazeux chauds et de gros volume		jusqu'à 100000	1000000 – 3000000			0,1 - 0,2
Traitement des composés inorganiques gazeux							
Système modulaire	Réduction principalement de HF	Ca(OH) ₂ en nid d'abeille	débits très bas	45000 – 100000	~500	~46000 EUR/an	
Absorbeur à lit à garnissage de type cascade	Réduction principalement de HF	CaCO ₃	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	40000 – 500000	~2000	30 - 55 EUR/tonne (livré) 4000 - 30000 EUR/an	23400 - 4800
Absorbeur à lit à garnissage de type cascade	Réduction principalement de HF, HCl et SO _x	Absorbant modifié/fabriqué	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	40000 - 500000	~2000	95 - 110 EUR/tonne (livré) jusqu'à 60000 EUR/an	

Traitement des composés inorganiques gazeux (suite)							
Absorbeur à lit à garnissage de type à contre-courant/modules série	Réduction principalement de HF, HCl et SO _x	CaCO ₃ et absorbant modifié/fabrique	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	80000 - 800000	~2500	30 - 55 EUR/tonne (livré) respectivement 95 - 110 EUR/tonne (livré)	
Sorption par voie sèche avec un filtre à manches (système de courant ascendant)	Réduction principalement de HF, HCl, SO _x et particules	Ca(OH) ₂ de différentes qualités	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	80000 - 1000000	~4000	95 - 110 EUR/tonne (livré) 8000 - 45000 EUR/an	107500 - 130700
Sorption par voie sèche avec un filtre à manches (système de courant ascendant) avec conditionnement du produit de réaction	Réduction principalement de HF, HCl, SO _x et particules	Ca(OH) ₂ de différentes qualités (avec ajout d'eau en faible quantité)	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	200000 - 1600000	~6500	95 - 110 EUR/tonne (livré) 8000 - 45000 EUR/an	107500 - 130700
Laveur humide	Réduction principalement de HCl et de SO _x	Eau alcaline	de 2500 à 140000 (sans limite inférieure ou supérieure)	400000 - 2000000	jusqu'à 8000	95 - 110 EUR/tonne (livré) 8000 - 45000 EUR/an + eau	
Traitement des composés organiques gazeux							
Postcombustion thermique dans un thermoréacteur (externe)	Réduction des COV		10000 – 50000	180000 - 420000	500 - 4500		
Combustion interne du gaz de carbonisation	Réduction des COV			42000 - 300000	500 - 8000		
<p>Nota : la colonne « dimensions/débits courants » et la colonne « estimation brute de l'investissement » affichent des plages. On peut raisonnablement supposer que les chiffres bas en m³ réel/h correspondent au chiffre bas en terme d'investissement en EUR et que le chiffre haut en m³ réel/h correspond au chiffre haut en terme d'investissement en EUR. Entre les deux, l'augmentation n'est pas linéaire car normalement, plus le volume en m³ réel/h est élevé, moins l'investissement par m³ réel est cher.</p> <p>¹⁾ Les débits sont exprimés en « m³ réel » (par opposition au m³ normal, à l'état normal) car ce sont les effluents gazeux réels qu'il faut traiter.</p>							

Tableau 4.7 : Coûts relatifs au traitement des poussières, des composés inorganiques gazeux et des composés organiques gazeux par différentes techniques de traitement

4.4 Eaux de process

4.4.1L'eau utilisée comme matière première

L'eau est une matière première de prime importance pour les industries céramiques, mais les quantités utilisées varient considérablement d'un secteur et d'un procédé à l'autre. L'eau qui s'ajoute directement aux mélanges de pâtes céramiques n'engendre aucun problème d'eaux usées, car elle s'évapore ensuite dans l'air lors des étapes de séchage et de cuisson. Les eaux de process sont générées principalement lorsque les matières argileuses sont évacuées ou mises en suspension dans l'eau courante, lors des différentes étapes du procédé de fabrication.

4.4.2L'eau utilisée comme véhicule d'échange de chaleur

L'eau remplit cette fonction lors du refroidissement des circuits hydrauliques, des compresseurs, etc. L'eau utilisée à cette fin doit être propre et présenter une faible dureté, pour empêcher que les échangeurs de chaleur ne s'entartrent. L'eau utilisée peut circuler en circuit fermé après de simples opérations de refroidissement et/ou de nettoyage et ainsi, la consommation d'eau correspond à la quantité d'eau évaporée. Etant donné que, dans la plupart des cas, l'eau se trouvant dans les circuits fermés et destinée aux opérations de refroidissement a été conditionnée chimiquement pour éviter la corrosion ou la fermentation des matières organiques, tout traitement avec des eaux usées de production n'est en général pas possible (à ce sujet, voir aussi le BREF relatif aux systèmes de refroidissement industriels).

4.4.3L'eau utilisée comme agent de lavage

L'eau s'utilise également dans les laveurs d'effluents gazeux (systèmes d'épuration des effluents gazeux par voie humide et dépoussiéreurs humides). Dans ces systèmes, les eaux de process recyclées qui ont été traitées grâce à un simple processus physique (décantation avec ou sans traitement chimique préalable) peuvent être utilisées, ainsi que recirculées ou retraitées.

4.4.4L'eau utilisée comme agent de nettoyage

L'eau sert à nettoyer les installations, et plus particulièrement, les unités de préparation des matières premières, les moules et d'autres unités de coulage, les chaînes d'émaillage, les unités d'engobage et d'autres unités de décoration. Le nettoyage est l'opération qui utilise la plus grande quantité d'eau et qui exige un mode de gestion adapté, permettant de réaliser des économies et d'éviter les eaux de process. La consommation d'eau peut diminuer si l'eau est traitée et réutilisée plusieurs fois au cours du nettoyage.

4.4.5Objectifs et solutions pour la réduction des eaux de process (émissions et consommations)

Les objectifs du traitement des eaux issues des procédés de fabrication des céramiques consistent à abaisser la consommation d'eau et à produire un minimum d'émissions d'eaux de process. La réalisation de ces objectifs passe par des mesures d'optimisation des procédés et des systèmes de traitement des eaux de process.

4.4.5.1 Optimisation des procédés

Description et bénéfices environnementaux obtenus

Il est fondamental de minimiser la consommation d'eau et pour parvenir à cette réduction, les mesures d'optimisation de procédé suivantes peuvent être mises en œuvre :

- intervenir sur le circuit d'eau, installer des clapets automatiques destinés à empêcher les fuites d'eau lorsque cette eau n'est plus nécessaire
- installation d'un système haute pression au sein de l'usine, à des fins de nettoyage (ou de matériel de nettoyage haute pression)
- passer des systèmes d'épuration des effluents gazeux par voie humide à des systèmes alternatifs, non consommateurs d'eau (nettoyage au moyen de systèmes d'épuration des effluents gazeux par voie sèche, voir les sections 4.2.3 et 4.3.4)
- installation de systèmes de récupération des déchets d'email « in situ »
- installation de systèmes de tuyaux d'approvisionnement en barbotine
- séparer la collecte des flux d'eaux de process provenant des différentes étapes du procédé
- réutilisation des eaux de process dans la même étape de procédé et notamment, réutilisation répétée des eaux de nettoyage après un traitement adéquat.

Effets inter-milieux

Sans objet.

Données opérationnelles

La solution optimale consiste à réutiliser les eaux de process lors de la même étape de procédé. Pour déterminer la quantité maximale d'eaux de process qu'il est possible de réutiliser au sein de l'installation et pour concevoir de telles solutions, on peut établir un bilan aqueux (ou « débit massique ») qui indique tous les points générateurs d'eaux de process, les quantités produites et toutes les façons possibles de les utiliser.

A ce sujet, le tableau suivant montre les taux de recyclage des eaux de process qui peuvent être obtenus dans différents secteurs de l'industrie céramique. Les données sont les taux moyens et les taux les plus élevés obtenus en Allemagne, par secteur et par rapport aux quantités d'eaux de process produites [4, UBA, 2001].

Secteur	Moyenne	Taux maximum
Carreaux pour sols et murs	70 - 80 %	100 %
Céramiques domestiques	s.o.	50 %
Appareils sanitaires	30 - 50 %	50 %

Tableau 4.8 : Taux de recyclage des eaux de process réalisables dans différents secteurs de l'industrie céramique

Des taux de réutilisation variables des eaux de process, par rapport à l'eau de process nécessaire, sont réputés réalisables pour la fabrication de différents produits de carreaux pour sols et murs : de 10 % (grès non émaillé) à 70 % (carreaux émaillés mono-cuisson et grès émaillé)[6, Timellini, 2004].

Ces taux de recyclage et de réutilisation des eaux de process sont obtenus grâce à une combinaison des mesures d'optimisation de procédé et de l'application des systèmes de traitement des eaux de process mentionnés à la section 4.4.5.2.

Applicabilité

Des mesures d'optimisation de procédé visant à minimiser la consommation d'eau peuvent être appliquées dans tous les secteurs de l'industrie céramique.

Aspects économiques

Ils dépendent de la mesure ou de la tâche liée à tel ou tel cas individuel particulier, mais la minimisation de la consommation d'eau s'accompagne généralement d'une diminution des coûts de l'eau fraîche.

Elément moteur de la mise en œuvre

Economiser sur les coûts en exécutant les procédés de manière efficace.

Installations types et documents de référence

[3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998], [13, SYKE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.4.5.2 Systèmes de traitement des eaux de process

A ce sujet, le lecteur trouvera des informations intéressantes dans le BREF sur le traitement des eaux et gaz résiduaires courants et leurs systèmes de management dans l'industrie chimique.

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Les principaux systèmes de traitement des eaux de process sont les suivants :

Homogénéisation : des cuves d'homogénéisation sont utilisées pour obtenir une composition cohérente de l'eau à traiter et pour supprimer, dans la mesure du possible, les inconvénients liés aux variations des constituants. L'utilisation de ces cuves permet des améliorations dans tous les traitements consécutifs, car l'homogénéité obtenue facilite le contrôle des produits ajoutés et assure la cohérence dans le fonctionnement des installations.

Aération : il s'agit d'un processus physique fréquemment utilisé dans le traitement de l'eau à différentes fins, par exemple l'oxydation des matières pour faciliter ensuite leur floculation, l'oxygénation des composés organiques présents dans les eaux de process, l'élimination des odeurs etc. Le matériel d'aération peut comporter des agitateurs de surface ou des turbines.

Sédimentation (décantation) : elle consiste à séparer partiellement les particules solides d'un liquide, par gravité. Il existe différents types de bacs de sédimentation ; ceux-ci peuvent être rectangulaires, circulaires ou lamellaires.

Filtration : la filtration consiste à séparer les matières en suspension d'un liquide, en faisant passer la suspension à travers un milieu poreux qui retient les matières et laisse passer le liquide. Les types utilisés dans l'industrie céramique sont les filtres en profondeur, les filtres-presses et les filtres à vide rotatifs

Absorption sur charbon actif : ce traitement repose sur la capacité du charbon à absorber facilement les molécules organiques présentes dans l'eau. Ce système convient parfaitement à l'élimination des substances organiques non biodégradables.

Précipitation chimique : il s'agit d'un processus destiné à éliminer différents éléments dissous, en les précipitant sous forme de composés insolubles, à l'aide de réactifs tels que la chaux.

Coagulation et floculation : l'objectif de ce traitement est de faire éclater les suspensions colloïdales et de produire un agglomérat de particules en utilisant, par exemple, des aluns ou un polyélectrolyte et/ou une association de chaux et de sels métalliques.

Echange d'ions et osmose inverse : ces processus servent à éliminer le bore de l'eau de nettoyage issue des sections d'email et d'application. L'osmose inverse s'applique également à la réduction des quantités d'eaux de process destinées à être évacuées.

L'application de ces mesures individuellement ou en combinaison permet d'obtenir des réductions importantes des émissions d'eaux de process et de réduire la consommation d'eau (voir aussi le tableau 4.8).

Effets inter-milieux

Les résidus de sédimentation/filtration doivent être éliminés, si aucune réutilisation n'est possible (notamment si des agents de floculation, de précipitation ou d'absorption sont utilisés).

Données opérationnelles et applicabilité

Les systèmes de traitement des eaux de process peuvent être appliqués dans tous les secteurs de l'industrie céramique, mais il convient de prendre en considération la tâche concernée :

- si les eaux de process doivent être réutilisées dans le procédé de préparation de la pâte, cela ne nécessite en principe aucun traitement, mais il faudra une cuve d'homogénéisation pour s'assurer que les caractéristiques restent les plus cohérentes possibles
- si l'eau doit être réutilisée pour le nettoyage des installations, la qualité de l'eau devra être plus élevée, ce qui rend nécessaire une sédimentation suivie d'une aération, avec ou sans traitement chimique consécutif pour supprimer les odeurs
- les eaux de process en excès qui doivent être évacuées vers l'extérieur nécessitent normalement une combinaison de techniques d'homogénéisation, de floculation, de sédimentation et de filtration. Par ailleurs, une osmose inverse est appliquée ensuite pour réduire la quantité d'eau de process évacuée.

A titre d'exemple, la figure ci-après montre le schéma de traitement d'une station d'épuration des eaux de process d'un fabricant de porcelaine de table, constituée d'une combinaison des systèmes de traitement des eaux de process mentionnés ci-dessus [4, UBA, 2001].

Homogenisation buffer container	Cuve tampon d'homogénéisation
Flocculation reactor	Réacteur de floculation
Filtrate	Filtrat
Porcelain production	Production des porcelaines
Phase separation thickener	Clarificateur à séparation des phases
Filter cake dewatering chamber filter press	Filtre-pressé à chambres pour déshydratation des gâteaux de filtration
Filter cake	Gâteau de filtration
Solids	Solides
Ground water	Nappe phréatique
Deep filtration sand filter	Filtre à sable pour filtration poussée
Waste dump	Décharge (stockage de déchets)
Deep filtration PP-filter candles	Filtre à bougies de type PP pour filtration poussée
Permeate	Perméat
Reverse osmosis composite-diaphragm	Membrane composite pour osmose inverse
Concentrate	Concentrat
Waste water drainage	Vidange des eaux usées

Figure 4.16 : Schéma de traitement d'une station d'épuration des eaux de process

A ce sujet, voir le tableau 3.38 qui montre l'analyse correspondante des eaux de process relative aux différentes étapes du procédé et le tableau 3.39, qui montre une analyse des eaux de process d'une usine de céramiques domestiques où l'épuration est effectuée au moyen d'un procédé de précipitation chimique.

Voir également le tableau 3.49, qui montre une analyse d'eaux de process épurées issues d'un procédé de fabrication de céramiques techniques (isolants électriques) dans lequel l'épuration des eaux de process s'effectue par floculation, par séparation avec un clarificateur à tôles inclinées et par filtration avec un filtre-presse, tandis que le tableau 3.50 montre aussi des concentrations en polluants dans des eaux de process issues d'un fabricant d'isolants électriques après floculation, mais sans filtration.

Aspects économiques

Si les eaux de process doivent être évacuées par voie externe, le respect des limites stipulées dans la législation en vigueur nécessite l'association coûteuse de plusieurs étapes de traitement dont la sédimentation, la précipitation chimique, la floculation, et d'un processus final à base d'échange d'ions ou d'osmose inverse, comme indiqué ci-dessus.

Si l'eau épurée issue des systèmes de traitement des eaux de process peut être réutilisée, cela permet de réduire les coûts d'eau fraîche. L'association de mesures de recyclage/réutilisation des eaux de process et de mesures d'optimisation de procédé, visant à minimiser la consommation d'eau, permet d'économiser les coûts associés à l'évacuation des déchets issus des traitements précités.

Elément moteur de la mise en œuvre

- obligations légales
- économie en termes de consommation d'eau et de matières premières.

Installations types et documents de référence

[1, MBLFUW, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [10, Navarro, 1998], [13, SYKE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [30, TWG Ceramics 2005], [31, Probst, 2005].

4.5 Déchets de production

4.5.1 Boues issues de la fabrication des produits céramiques

4.5.1.1 Systèmes de recyclage des boues

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Le recyclage consiste à réutiliser les boues dans les pâtes céramiques, comme on le fait pour les suspensions aqueuses et les barbotines contenant des matières céramiques, par exemple pour la fabrication des carreaux pour sols et murs, voir aussi les sections 2.3.5 et 3.3.5.

Des systèmes de recyclage des boues peuvent être aisément mis en œuvre dans des installations où la préparation des matières premières se fait par broyage humide, car les boues peuvent être directement utilisées sans subir de traitement ultérieur, ou en subissant de simples traitements physiques ou physico-chimiques, l'avantage étant en outre la possibilité d'utiliser l'eau qu'elles contiennent comme eau de broyage. S'il s'agit d'un procédé de préparation de la pâte par voie sèche, bien que l'ajout des boues ne pose en soi aucun problème, sa gestion sera plus complexe car il faudra commencer par sécher les boues.

La figure ci-après est une représentation schématique d'une installation de recyclage des boues d'une fabrique de carreaux pour sols et murs (par voie humide) [4, UBA, 2001]. Les boues sont pompées du bassin de stockage dans un poste de dégrillage à deux étages. Elles passent ensuite par un filtre de déferrisation puis sont envoyées dans un réservoir de pré-pompage d'une capacité de 3 m³. De là, les boues sont pompées et envoyées dans deux bassins tampons de 200 m³ qui sont remplis par alternance. Après vérification des caractéristiques des boues et obtention d'un résultat positif de l'analyse, les boues sont envoyées au bassin de stockage principal, d'une capacité de 400 m³. Les boues de céramique sont transportées semi-automatiquement depuis le bassin de stockage principal jusqu'à des conteneurs de dosage à partir desquels sont alimentés les broyeurs à tambour pour les différentes charges.

Sludge storage	Stockage des boues
Proportion containers	Conteneurs de dosage
Screening device	Dispositif de dégrillage
Buffer basin	Bassin tampon
Storage basin	Bassin de stockage
Deferrisation filter	Filtre de déferrisation
Pre-pump storage	Stockage avant pompage
Drum mills	Broyeurs à tambour

Figure 4.17 : Vue schématique d'une installation de recyclage des boues

La mise en place d'un système de recyclage des boues permet non seulement de réduire la consommation de matières premières et d'eau, mais également de réduire les rejets de polluants dans l'environnement.

Effets inter-milieux

S'il faut faire sécher les boues pour pouvoir les réutiliser, la consommation d'énergie va augmenter. Il convient également de prendre garde à d'éventuelles conséquences négatives liées au fait que les polluants issus de telle ou telle phase ou section du procédé ou de l'installation, par exemple de la préparation et de l'application de l'émail, sont introduits dans une autre phase ou section, par exemple la préparation de la pâte céramique. Le contrôle des émissions gazeuses et des eaux de process représente une solution appropriée pour empêcher ces conséquences négatives.

Données opérationnelles et applicabilité

La quantité de boues produites dans une fabrique de carreaux pour sols et murs varie de 0,09 à 0,15 kg/m² de produit fini sur une base sèche, ce qui représente, pour un produit ayant une densité pâteuse de 15 à 20 kg/m², de 0,4 à 1,0 % (kg de boues sèches/kg de pâte céramique). Si la totalité des boues résultant du traitement des eaux usées produites dans le procédé sont réutilisées dans le procédé de préparation de la pâte céramique, l'ajout par rapport aux matières premières de la pâte sera donc d'environ 0,4 à 1,0 % sur une base sèche. Or, il s'avère qu'un apport de 1 à 1,5 % de boues aux pâtes céramiques préparées pour la fabrication de carreaux n'a généralement aucune incidence sur le comportement des produits lors du procédé de fabrication [10, Navarro, 1998], [32, TWG Ceramics, 2006].

Par conséquent, à la fois au vu du bilan massique et du changement de comportement résultant, une intégration totale des boues aux procédés de broyage humide est techniquement possible et facilite la gestion du procédé.

Pour les procédés humides dans lesquels le poste de préparation de la pâte céramique est une installation indépendante, ou s'il se trouve à l'écart de l'installation de production, les boues peuvent être renvoyées par voie routière. Les suspensions aqueuses et les boues peuvent être renvoyées par camions-citernes ou acheminées par canalisation.

L'utilisation de boues contenant des déchets d'émail comme élément constitutif de l'émail semble être, a priori, une option tout à fait valable. Toutefois, le principal inconvénient de ce procédé réside dans le caractère fortement hétérogène de la composition de ces boues au fil du temps, et qui est lié à la diversité des émaux généralement utilisés en production au même moment chez la plupart des fabricants. Par ailleurs, ces boues ne peuvent être le seul constituant de l'émail, mais sont considérées comme un additif (elles servent par exemple de fondant). Bien que ce soit une très bonne solution dans certains cas, notamment si l'on applique un seul émail, voire quelques-uns seulement au sein d'une installation, l'utilisation de ce type de boues dans la préparation de l'émail ne peut être considérée comme une solution généralisée.

Par conséquent, la réutilisation des boues ne s'applique pas dans la totalité des cas. S'il existe des critères spéciaux de qualité ou de performance, les boues ne pourront être réutilisées que dans d'autres produits (voir la section 4.5.1.2).

Aspects économiques

Le recyclage ou la réutilisation des boues permettent d'éviter - et donc d'économiser - les coûts d'évacuation.

Elément moteur de la mise en œuvre

Economiser sur les coûts en économisant sur les matières premières et la consommation d'eau et en évitant la production de déchets.

Installations types et documents de référence

[3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [6, Timellini, 2004], [10, Navarro, 1998], [13, SYKE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006]

4.5.1.2 Réutilisation des boues dans d'autres produits

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Les boues peuvent être réutilisées dans des secteurs de l'industrie céramique autres que les secteurs générateurs de ces boues, car cette opération peut représenter des solutions intéressantes sur le plan technique ou avantageuses sur le plan économique. Par exemple, les boues issues de la fabrication des céramiques domestiques ou des appareils sanitaires peuvent servir de matière première ou d'additif entrant dans la fabrication des blocs d'argile et dans celle des granulats d'argile expansée.

Cela permet, d'une part, d'éviter les déchets et d'autre part, d'économiser les matières premières.

Effets inter-milieux

S'il faut faire sécher les boues pour pouvoir les réutiliser, la consommation d'énergie va augmenter. Il convient également de prendre garde à d'éventuelles conséquences négatives liées au fait que les polluants issus de tels ou tels phase ou section ou secteur du procédé ou de l'installation ou de l'industrie, par exemple de la préparation et de l'application de l'émail dans la fabrication des céramiques domestiques, sont introduits dans une phase ou une section ou un secteur différents, par exemple, la préparation de la pâte dans une briqueterie. Le contrôle des émissions gazeuses et des eaux de process représente une solution appropriée pour empêcher ces conséquences négatives.

Données opérationnelles et applicabilité

Si les boues sont destinées à être réutilisées dans la fabrication de produits de construction, il conviendra de tenir compte des températures de fusion des émaux qui font partie des boues, ainsi que des propriétés de fluxage, qui peuvent avoir une incidence sur leurs propriétés en tant que produit.

Aspects économiques et élément moteur de la mise en œuvre

Economiser de l'argent en économisant sur les matières premières et les coûts d'élimination.

Installations types et documents de référence

[3, CERAME-UNIE, 2003], [13, SYKE, 2004], [22, SYKE, 2004], [23, TWG Ceramics, 2005]

4.5.2 Déchets de production solides

La présente section traite des possibilités de réduction des déchets solides produits au cours des différentes étapes des procédés de fabrication des produits céramiques. Les installations/techniques génératrices de déchets de production solides ont déjà été traitées au sein du présent document, notamment dans les chapitres 2 et 4 relatifs aux techniques de réduction des poussières.

4.5.2.1 Considérations générales relatives à la réutilisation des déchets de production solides en tant que matières premières

Les poussières recueillies lors du chargement, du déchargement, du convoyage, de la manutention mécanique et de la transformation des matières premières peuvent normalement être réutilisées en tant que matières premières. Par exemple, lors du stockage des matières premières, toutes les poussières de filtration peuvent être directement réintroduites dans le procédé de fabrication ou dans le silo, lorsqu'on utilise un système localisé d'épuration de l'air au moyen d'un filtre monté au sommet du silo. Mais cette réintroduction directe peut s'avérer impossible lorsqu'on utilise un poste de dépoussiérage central, en raison des différentes matières premières qui sont mélangées.

Par ailleurs, on peut normalement réutiliser en tant que matières premières les déchets de production qui sont générés avant la cuisson, en les rajoutant au mélange des matières premières. Les coupes, les moules en plâtre usagés ainsi que la poussière constituent les principaux déchets de production engendrés par le procédé de façonnage. Les pièces découpées en provenance de la presse sont souvent repoussées de la table de pressage, collectées sous la presse et réintroduites directement dans la zone de stockage des matières de la presse. En outre, les poussières ou les pièces découpées sont souvent réintroduites en tant qu'éléments de fournée dans une barbotine de coulage ou dans des masses de grès. Les moules en plâtre usagés peuvent être réutilisés dans l'industrie cimentière ou de façon partielle, après concassage et broyage, dans l'industrie des engrais.

Les poussières issues d'un système d'épuration des effluents gazeux ne peuvent être réutilisées que dans certaines conditions, car elles sont susceptibles de contenir de fortes concentrations de soufre et de fluor. Une fois rajoutées au mélange des matières premières, ces poussières peuvent provoquer une augmentation des émissions de HF et de SO_x au cours de la cuisson. Par ailleurs, les poussières issues d'un système d'épuration des effluents gazeux sont susceptibles de contenir des particules d'un adsorbant tel que la chaux - en l'occurrence, si on utilise un système d'adsorption à base de chaux - qui peuvent influencer sur les propriétés des produits. Par conséquent, une conduction séparée des différents flux d'effluents gazeux facilite une réutilisation optimale des déchets issus des procédés générateurs de poussières. Dans la fabrication des granulats d'argile expansée, les poussières sont le plus souvent recyclables.

Le gypse généré au cours de l'épuration des effluents gazeux, notamment dans la fabrication des granulats d'argile expansée ou dans l'industrie des briques et des tuiles, ne peut être réutilisé dans le procédé, mais il sert à l'industrie cimentière comme régulateur de durcissement. Les matières qui ne peuvent pas être recyclées dans le processus de fabrication sont expédiées hors de l'usine pour servir à d'autres industries ou sont acheminées vers des centres de recyclage ou d'élimination des déchets.

Les produits cuits qui sont invendables (déchets de casse) et les auxiliaires de cuisson cassés ainsi que les réfractaires cassés provenant des fours peuvent dans certains cas, après avoir été broyés, être réutilisés comme matières premières. Les déchets de casse qui ne peuvent être réutilisés dans le procédé peuvent parfois servir de matière première dans d'autres industries ; par exemple, les roulements cassés en abrasif inorganique sont utilisés comme matière réfractaire dans des fours d'aciéries ou comme remblai dans la construction des routes. Les briques cassées peuvent servir, par exemple, comme substrats pour toits verts et terrains de tennis ou comme granulats pour bétons spéciaux.

Par rapport à une mise en décharge des déchets, la réutilisation de déchets de production solides représente :

- une réduction des matières premières utilisées
- une réduction des rejets de polluants dans l'environnement
- les déchets de production solides permettent d'éviter - et donc d'économiser - les coûts d'élimination, ainsi que certains coûts matériels.

[2, VITO, 2003], [3, CERAME-UNIE, 2003], [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005] [26, UBA, 2005], [28, Schorcht, 2005]

4.5.2.2 Considérations générales sur les moules en plâtre, les auxiliaires de cuisson et les déchets de casse - les éviter/les remplacer/les réduire

L'application de techniques modernes au niveau du procédé de façonnage procure des possibilités considérables pour prévenir les déchets. Des procédés tels que le coulage en barbotine dans des moules en plâtre peuvent être remplacés par des postes de coulage en barbotine sous pression, au moyen de moules en polymère. Cette méthode permet d'éviter l'utilisation de moules en plâtre, d'économiser de surcroît jusqu'à 20 % sur les matières premières et de réduire les boues blanches. L'utilisation de presses isostatiques avec des moules en polymère évite également d'avoir à utiliser des moules en plâtre. Dans certains secteurs, notamment dans la fabrication de tuiles, il est possible d'utiliser des moules métalliques fermés à la place des moules en plâtre ouverts. Toutefois, le remplacement des moules en plâtre ne peut se faire que si une nouvelle unité de coulage est construite ou que l'ancienne est totalement rénovée, opération qui revient cher et qui est difficilement réalisable, surtout pour des entreprises à petit volume d'activité. Dans certains cas, des soucis de qualité peuvent apparaître lorsqu'on utilise des moules en plâtre, ceux-ci ayant tendance à présenter des arêtes tranchantes. En outre, les moules métalliques présentent un taux d'épuisement de l'eau extraite de l'argile lors du moulage qui est nettement plus faible que celui des moules en plâtre.

On peut également réduire la quantité de moules en plâtre usagés en augmentant leur durée de vie. L'utilisation de mélangeurs à plâtre automatiques et de mélangeurs à plâtre sous vide permet de produire des moules en plâtre plus durs, ce qui permet de doubler ou de tripler leur durée de vie. Toutefois, dans le procédé de pressage humide utilisé pour les tuiles en argile, il est généralement impossible d'augmenter la dureté du plâtre. Il faut trouver le meilleur compromis entre la porosité et la dureté de surface, afin de respecter les critères de déshydratation et de résistance à l'usure.

En ce qui concerne le procédé de cuisson, il existe également des mesures qui permettent d'empêcher directement la production de déchets grâce à des techniques modernes. Si, au lieu d'une cuisson dans un four tunnel à capsule ou à étagères, on utilise des systèmes à cuisson rapide tels que des fours à rouleaux, on peut réduire la quantité d'auxiliaires de cuisson (usagés), mais dans ce contexte, il faut tenir compte du fait que la durée de vie de ces auxiliaires de cuisson dépend de la température (qui est généralement plus élevée dans un four à rouleaux) et de la manutention (qui est plus fréquente en cuisson rapide, du fait que le temps de cuisson est plus court). En outre, la cuisson rapide engendre davantage de rejets de produits céramiques - par exemple de tuiles - lorsque la forme est complexe, car elle convient principalement aux produits plats et ne peut donc s'appliquer dans la totalité des cas.

Le pourcentage de déchets de casse issus du procédé de cuisson peut être réduit grâce à un contrôle électronique précis de la courbe de cuisson et grâce à une optimisation de l'enfournement [4, UBA, 2001], [23, TWG Ceramics, 2005].

4.6 Considérations générales relatives au bruit

La présente section traite des possibilités de réduction des bruits produits au cours des différentes étapes des procédés utilisés dans la fabrication des produits céramiques. D'une part, certaines installations/techniques génératrices de bruit ont déjà été abordées au sein du présent document et, d'autre part, de nombreux aspects relatifs au bruit ne sont pas réellement spécifiques à tel ou tel secteur.

Une réduction des émissions sonores s'obtient souvent en appliquant les mesures directement à la source du bruit. Les principales sources de bruit sont, par exemple, les systèmes pneumatiques de nettoyage de filtre, les compresseurs, les moteurs des unités de préparation et ceux des unités de manutention. Une protection sonore peut être réalisée grâce au capotage de l'unité bruyante ou à la construction de murs anti-bruit. Les systèmes à double paroi ou le gainage dans une structure à double enveloppe sont très efficaces car, en outre, l'air qui se trouve entre la première et la deuxième paroi garantit un niveau de protection contre le bruit encore plus élevé.

Les vibrations et le bruit engendrés par un certain nombre d'installations (notamment des presses, des concasseurs et des mélangeurs) ne pouvant être réduits de façon efficace par les mesures précitées, il convient d'éviter le transfert de ces vibrations et bruits grâce à un système d'isolation contre les vibrations. Les suspensions métalliques, les raccords en caoutchouc et en métal et les composants en feutre, en caoutchouc, en liège, ainsi qu'une isolation contre les vibrations de toute la base au moyen d'une couche de bitume ou un bâti de moteur individuel sont autant de mesures efficaces pour réduire les vibrations et le bruit. Comme autres mesures de réduction des émissions de bruit au niveau des unités, on peut citer l'utilisation de silencieux à la source du bruit et le remplacement de ventilateurs à rotation rapide par des ventilateurs de plus grande taille mais à rotation plus lente.

Si les mesures précitées de protection contre le bruit sont inapplicables, ou si le transfert des unités génératrices de bruit à l'intérieur des bâtiments est impossible, il convient de prendre des mesures secondaires de protection contre le bruit - souvent au niveau du bâtiment lui-même. Cela peut passer par des murs plus épais et une insonorisation des fenêtres (fenêtres à vitrage multiple, qui contribuent également aux économies de chauffage) lesquelles doivent rester fermées lors des opérations bruyantes. A ce propos, il convient toutefois de mentionner que la nécessité de fermer les fenêtres implique souvent l'installation de systèmes de ventilation (onéreux et gourmands en énergie) pour pouvoir assurer de bonnes conditions de travail. Il est possible, par ailleurs, de réorienter les fenêtres, les portes et les installations extérieures bruyantes dans la direction opposée des zones résidentielles environnantes.

La façon de travailler du personnel influe également sur les émissions de bruit. Les portes doivent être fermées si les va et vient de circulation ne sont pas nécessaires, et une conduite prudente des camions et des chariots élévateurs sur le site permet également de réduire les émissions de bruit. Il faut en outre éviter d'imposer des limites horaires pour certaines tâches très bruyantes, par exemple le déversement des déchets de casse ou la circulation des chariots élévateurs à l'extérieur le soir ou la nuit. La réduction du bruit passe également par un entretien régulier des unités par graissage, ainsi que par le remplacement des silencieux en temps utile [4, UBA, 2001].

L'élément moteur de la mise en œuvre d'une mesure de protection contre le bruit étant normalement une obligation légale (protection du voisinage ou du lieu de travail), d'un point de vue économique il s'agit principalement d'une question de dépenses, notamment si elle s'accompagne de mesures de construction.

4.7 Outils de management environnemental

Description

La meilleure performance environnementale est généralement réalisée lorsqu'on installe la meilleure technologie et qu'on l'exploite de la manière la plus efficace et efficiente possible. C'est ce qui ressort de la définition que donne la directive IPPC du terme « techniques », à savoir *« aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt »*.

Pour des installations IPPC, un système de management environnemental (SME) est un outil qui aide les exploitants à résoudre ces questions de conception, de construction, d'entretien, d'exploitation et de mise à l'arrêt d'une manière systématique et justifiée. Un SME comprend la structure organisationnelle, les responsabilités, les pratiques, les procédures, les procédés et les ressources permettant de développer, mettre en œuvre, entretenir, examiner et surveiller la politique environnementale. C'est lorsqu'il fait intrinsèquement partie de la gestion et de l'exploitation globales d'une installation que le système de management environnemental est le plus efficace.

Au sein de l'union européenne, de nombreuses organisations ont décidé, sur la base du volontariat, de mettre en œuvre des systèmes de management environnemental fondés sur la norme européenne EN ISO 14001:2004 ou sur le système de management environnemental et d'audit de l'UE (EMAS). Le système EMAS intègre les critères de système de management de la norme EN ISO 14001:2004, mais il met aussi l'accent sur le respect de la législation, la performance environnementale et la participation des salariés ; il nécessite aussi une vérification externe du système de management et une validation par une déclaration environnementale publique (dans la norme EN ISO 14001:2004, une auto-déclaration est une alternative à une vérification externe). Il existe également de nombreuses organisations qui ont décidé de mettre en place des SME non normalisés.

Bien que les systèmes normalisés (EN ISO 14001:2004 et EMAS) et les systèmes non normalisés (« personnalisés ») considèrent en principe l'organisation comme étant l'entité, le présent document adopte une approche plus restrictive, qui n'inclut pas toutes les activités de l'organisation, notamment en matière de produits et de services, en raison du fait que l'entité régulée au titre de la directive IPPC est l'installation (telle qu'elle est définie à l'article 2).

Un système de management environnemental (SME) pour une installation IPPC peut contenir les composants suivants :

- (a) définition d'une politique environnementale
- (b) planification et établissement d'objectifs et de cibles
- (c) mise en œuvre et application des procédures
- (d) vérification et actions correctives
- (e) examen par la direction générale
- (f) élaboration d'une déclaration environnementale régulière
- (g) validation par un organisme de certification ou un vérificateur de SME extérieur
- (h) considérations de conception pour la mise à l'arrêt de l'installation en fin de vie
- (i) développement de technologies plus propres
- (j) analyses comparatives.

Ces différents éléments sont expliqués de manière relativement plus approfondie ci-après. Pour des informations détaillées sur les éléments (a) à (g), qui font tous partie du système EMAS, le lecteur est invité à se reporter à la littérature de référence indiquée ci-après.

(a) Définition d'une politique environnementale

Les dirigeants sont responsables de définir une politique environnementale pour une installation et de s'assurer que celle-ci :

- est adaptée à la nature, à l'échelle et à l'impact environnemental des activités
- comporte un engagement pour la prévention et la réduction de la pollution
- comporte un engagement à se conformer à toutes les législations environnementales applicables dans ce domaine et aux autres critères auxquels souscrit l'organisation
- fournit le cadre de référence pour définir et analyser les objectifs et cibles environnementaux
- est documentée et communiquée à tous les salariés
- est mise à la disposition du public et de toutes les parties intéressées.

(b) Planification, c'est-à-dire :

- des procédures permettant d'identifier les aspects environnementaux de l'installation, afin de déterminer les activités qui ont ou qui sont susceptibles d'avoir des impacts significatifs sur l'environnement, et de maintenir ces informations à jour
- des procédures permettant d'identifier et d'avoir accès à des critères légaux ou autres auxquels souscrit l'organisation et qui peuvent s'appliquer aux aspects environnementaux de ses activités
- établir et réviser des objectifs et cibles environnementaux documentés, en tenant compte des critères légaux et autres et des vues des parties intéressées
- établir et tenir régulièrement à jour un programme de management environnemental, comportant la désignation de qui est responsable de la réalisation des objectifs et cibles à chaque niveau de fonction concerné ainsi que des moyens et des délais dans lesquels ils doivent être réalisés.

(c) Mise en œuvre et application des procédures

Comme il est important d'avoir des systèmes en place pour s'assurer que les procédures sont connues, comprises et respectées, un management environnemental efficace doit comprendre :

(i) Structure et responsabilité

- définir, documenter et communiquer les rôles, responsabilités et autorités, ce qui comprend la désignation d'un représentant spécifique de la gestion
- fournir les ressources essentielles à la mise en œuvre et au contrôle du système de management environnemental, notamment les ressources humaines et les compétences spécialisées, la technologie et les ressources financières.

(ii) Formation, sensibilisation et compétence

- identifier les besoins en formation pour s'assurer que tous les personnels dont le travail est susceptible de modifier de façon importante les impacts environnementaux de l'activité ont reçu une formation appropriée.

(iii) Communication

- établir et entretenir des procédures de communication interne entre les différents niveaux et fonctions de l'installation, ainsi que des procédures qui favorisent le dialogue avec les parties externes intéressées et des procédures pour recevoir, documenter et, le cas échéant, répondre par une communication pertinente aux parties externes intéressées.

(iv) Engagement des salariés

- impliquer les salariés dans le processus visant à obtenir un haut niveau de performance environnementale en appliquant des formes de participation appropriées, comme le système de boîte à idées ou des travaux de groupe à base de projet ou des comités d'environnement.

- (v) Documentation
 - établir et maintenir une information actualisée, sur papier ou sous forme électronique, pour décrire les principaux éléments du système de management et leur interaction et pour orienter vers la documentation y afférente.
- (vi) Contrôle efficace des procédés
 - contrôler de façon appropriée les procédés dans tous leurs modes d'exploitation, à savoir la préparation, le démarrage, le fonctionnement habituel, l'arrêt et les conditions anormales
 - identifier les indicateurs clefs de performance et les méthodes de mesure et de contrôle de ces paramètres (par ex. débit, pression, température, composition et quantité)
 - documenter et analyser les conditions anormales de fonctionnement pour en identifier les causes principales puis tenter de les résoudre afin que de tels événements ne puissent se reproduire (cette démarche peut être facilitée par une culture où l'on ne recherche pas systématiquement le blâme mais où il importe davantage d'identifier les causes que de sanctionner les individus en conséquence).
- (vii) Programme de maintenance
 - établir un programme de maintenance structuré, qui repose sur des descriptions techniques du matériel, des normes etc., ainsi que sur d'éventuelles pannes de matériel et leurs conséquences
 - supporter ce programme de maintenance grâce à des systèmes d'enregistrement appropriés et des essais de diagnostic
 - répartir clairement les responsabilités de la planification et de l'exécution de la maintenance.
- (viii) Préparation et réaction aux situations d'urgence
 - établir et maintenir des procédures pour identifier les risques de survenue d'accidents et de situations d'urgence, ainsi que les réactions face à de telles situations, et permettant de prévenir et d'atténuer les impacts environnementaux pouvant être associés à ceux-ci.
- (d) Vérification et actions correctives, c'est-à-dire :
 - (i) Contrôle et mesure
 - établir et maintenir des procédures documentées permettant de surveiller et de mesurer à intervalle régulier les principales caractéristiques des opérations et des activités susceptibles d'influer de manière importante sur l'environnement, y compris l'enregistrement des informations de suivi précis de performance, les commandes d'exploitation associées et la conformité avec les objectifs et les cibles environnementaux de l'installation (*voir également le document de référence sur le contrôle des émissions*)
 - établir et maintenir une procédure documentée permettant d'évaluer périodiquement la conformité avec la législation et les réglementations environnementales y afférentes.
 - (ii) Actions correctives et préventives
 - établir et maintenir des procédures permettant de définir les responsabilités et les autorités chargées de gérer et d'analyser le non respect des conditions d'autorisation, des autres obligations légales, ainsi que des objectifs et cibles, d'engager des actions visant à atténuer les impacts provoqués et de mettre en œuvre et réaliser des actions correctives et préventives qui soient adaptées à l'ampleur du problème et proportionnelles à l'impact environnemental rencontré.
 - (iii) Enregistrements
 - établir et maintenir des procédures permettant d'identifier, de maintenir et d'avoir à disposition des enregistrements environnementaux lisibles, identifiables et traçables, y compris des enregistrements de formation et les résultats des audits et des révisions.

(iv) Audit

- établir et maintenir un ou plusieurs programmes et des procédures permettant de réaliser des audits périodiques du système de management environnemental qui comportent des entretiens avec le personnel, une inspection des conditions d'exploitation et du matériel et une révision des enregistrements et de la documentation et qui se traduisent par un rapport écrit, destinés à être effectués de façon impartiale et objective par les salariés (audits internes) ou des tiers (audits externes), couvrant le champ de l'audit, la fréquence et les méthodologies, ainsi que les responsabilités et les critères de réalisation des audits et de rapport des résultats, afin de déterminer si le système de management environnemental est conforme ou non aux dispositions prévues et s'il a été correctement mis en œuvre et maintenu
- réaliser l'audit ou le cycle d'audit, selon le cas, à intervalle de trois ans maximum, selon la nature, le volume et la complexité des activités, l'ampleur des impacts environnementaux associés, l'importance et l'urgence des problèmes détectés lors des audits précédents et l'historique des problèmes environnementaux - les activités plus complexes et ayant des incidences environnementales plus importantes seront auditées plus fréquemment
- mettre en place des mécanismes appropriés pour s'assurer que les résultats des audits font l'objet d'un suivi.

(v) Evaluation périodique du respect de la législation

- analyser la conformité avec la législation environnementale applicable et avec les conditions de la ou des autorisations environnementales détenues par l'installation
- documenter l'évaluation.

(e) Examen par la direction générale, à savoir :

- examen par la direction générale, aux intervalles qu'elle déterminera, du système de management environnemental, pour s'assurer en continu que ce dernier est adapté, justifié et efficace
- s'assurer que les informations nécessaires sont recueillies pour permettre à la direction de procéder à cette évaluation
- documenter l'examen.

(f) Elaboration d'une déclaration environnementale régulière :

- élaborer une déclaration environnementale qui s'attache plus particulièrement aux résultats obtenus par l'installation par rapport à ses objectifs et cibles en matière d'environnement. Cette déclaration est produite à intervalle régulier - une fois par an ou moins fréquemment, selon l'importance des émissions, de la production de déchets etc. Elle prend en compte les besoins en information des parties intéressées et elle est accessible au public (par ex., dans des publications électroniques, des bibliothèques etc.).

Au moment de produire une déclaration, l'exploitant peut utiliser les indicateurs de performance environnementale existants, en s'assurant que les indicateurs choisis :

- i. donnent une appréciation exacte des performances de l'installation
- ii. sont compréhensibles et sans ambiguïté
- iii. permettent des comparaisons d'une année sur l'autre pour évaluer l'évolution des performances environnementales de l'installation
- iv. permettent, tel qu'approprié, des comparaisons avec des critères de référence sectoriels, nationaux ou régionaux
- v. permettent, tel qu'approprié, des comparaisons avec les contraintes réglementaires.

(g) Validation par un organisme de certification ou par un vérificateur de SME extérieur :

- le fait que le système de management, la procédure d'audit et la déclaration environnementale soient examinés et validés par un organisme de certification agréé ou un vérificateur de SME extérieur peut permettre, si cet examen et cette validation sont effectués correctement, d'améliorer la crédibilité du système.

(h) Considérations de conception pour le démantèlement de l'installation en fin de vie

- prendre en considération l'impact environnemental lié à l'éventuel démantèlement de l'unité au moment de concevoir une nouvelle installation, sachant qu'une attitude prévoyante permet de rendre le démantèlement plus facile, plus propre et moins cher
- le démantèlement présente des risques environnementaux pour la contamination des sols (et des nappes phréatiques) et produit de grandes quantités de déchets solides. Les techniques de préventions sont spécifiques aux procédés, mais les considérations générales peuvent consister à :
 - i. éviter les structures souterraines
 - ii. intégrer des éléments qui facilitent le démantèlement
 - iii. choisir des finitions de surface qui soient faciles à décontaminer
 - iv. utiliser une configuration de matériel qui minimise la quantité de produits chimiques captifs et qui facilite leur élimination par drainage ou par lavage
 - v. concevoir des unités flexibles et intégrées qui permettent une fermeture par phases
 - vi. utiliser si possible des matières biodégradables et recyclables.

(i) Développement de technologies plus propres

- la protection de l'environnement doit être une composante intrinsèque de toutes les activités de conception de procédé exercées par l'exploitant, les techniques intégrées aux tout premiers stades de la conception étant à la fois plus efficaces et moins coûteuses. Envisager le développement de technologies plus propres peut se faire, par exemple, au travers d'activités ou d'études de recherche et développement. Comme alternative à des activités internes, des dispositions peuvent être prises pour rester se tenir au courant - et tel qu'approprié, mettre à profit - des travaux réalisés par d'autres exploitants ou instituts de recherche dans le domaine concerné.

(j) Analyses comparatives, à savoir :

- procéder à des comparaisons systématiques et régulières avec des critères de référence sectoriels, nationaux ou régionaux, notamment en ce qui concerne les activités d'efficacité énergétique et de conservation de l'énergie, le choix des matières premières, les émissions dans l'air et les rejets aqueux (en utilisant par exemple le registre européen des émissions de polluants, EPER), la consommation d'eau et la production de déchets.

SME normalisés et non normalisés :

Un SME peut prendre la forme d'un système normalisé ou d'un système non normalisé (« personnalisé »). La mise en œuvre et le respect d'un système normalisé et accepté au plan international, comme la norme EN ISO 14001:2004, peut conférer davantage de crédibilité au SME, surtout s'il fait l'objet d'une vérification extérieure correctement effectuée. Le système EMAS lui confère encore davantage de crédibilité en raison de l'interaction avec le public que permettent la déclaration environnementale et le mécanisme assurant le respect de la législation en vigueur en matière d'environnement. Cela dit, des systèmes non normalisés peuvent théoriquement se montrer tout aussi efficaces, à condition qu'ils soient correctement conçus et mis en œuvre.

Bénéfices environnementaux réalisés

La mise en œuvre et le respect d'un SME concentre l'attention de l'exploitant sur les performances environnementales de l'installation. En particulier, la maintenance et le respect de procédures opératoires claires à la fois pour les situations normales et les situations anormales, ainsi que des chaînes de responsabilité associées, doivent permettre de garantir que les conditions d'autorisation de l'installation et les autres cibles et objectifs en matière d'environnement sont respectés en toute circonstance.

Un système de management environnemental permet généralement d'assurer une amélioration continue des performances environnementales de l'installation. Plus le point de départ est bas, plus on peut s'attendre à des améliorations importantes à court terme. Si l'installation présente déjà globalement de bonnes performances environnementales, le système aidera l'exploitant à conserver ce degré élevé de performance.

Effets inter-milieux

Les techniques de management environnemental sont conçues en vue de s'attaquer à l'impact environnemental dans son ensemble, ce qui est cohérent avec l'approche intégrée de la Directive IPPC.

Données opérationnelles

Aucune information spécifique rapportée.

Applicabilité

Les éléments précités peuvent normalement s'appliquer à toutes les installations IPPC. L'étendue (par ex. le niveau de détail) et le caractère du SME (par ex. normalisé ou non normalisé) seront généralement liés à la nature, à l'ampleur et à la complexité de l'installation, ainsi qu'à la gamme de ses impacts éventuels sur l'environnement.

Aspects économiques

Il est difficile de déterminer de manière précise les coûts et les avantages économiques de la mise en place et du maintien d'un bon SME. Un certain nombre d'études sont présentées ci-dessous, mais ce ne sont que des exemples et leurs résultats ne sont pas totalement cohérents. Elles ne sont pas représentatives de tous les secteurs dans l'ensemble de l'Europe et par conséquent, il convient de les considérer avec circonspection.

Une étude suédoise réalisée en 1999 a analysé la totalité des 360 sociétés suédoises certifiées ISO et enregistrées EMAS. Avec un taux de réponse de 50 %, cette étude a tiré, entre autres, les conclusions suivantes :

- les frais liés à la mise en place et à l'application d'un SME sont élevés mais pas excessivement, sauf dans le cas de très petites entreprises. Ces frais vont probablement diminuer à l'avenir
- un plus haut niveau de coordination et d'intégration du SME avec d'autres systèmes de management est considéré comme une solution possible pour diminuer les coûts
- la moitié de tous les objectifs et cibles environnementaux sont rentabilisés en moins d'un an, grâce à des économies et/ou des augmentations de revenu
- les économies les plus importantes ont été réalisées par des diminutions de frais sur l'énergie, le traitement des déchets et les matières premières
- la plupart des entreprises estiment que leur position sur le marché a été renforcée grâce au SME. Un tiers de ces mêmes entreprises font état d'une hausse de leurs revenus grâce au SME.

Dans certains Etats membres, les frais de contrôle sont réduits si l'installation est certifiée.

Un certain nombre d'études¹ montrent qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre la taille de l'entreprise et le coût de mise en œuvre d'un SME. On retrouve cette même relation inversement proportionnelle pour le délai de récupération du capital investi. Ces deux éléments impliquent que la relation coût-avantage est moins favorable pour la mise en œuvre d'un SME au sein d'une PME qu'au sein d'une entreprise de taille plus importante.

D'après une étude suisse, le coût moyen que représentent l'élaboration et l'exploitation d'un système ISO 14001 peut varier de la façon suivante :

- pour une société employant de 1 à 49 salariés : 64000 CHF (44000 EUR) pour élaborer le SME et 16000 CHF (11000 EUR) par an pour le faire fonctionner
- pour un site industriel employant plus de 250 salariés : 367000 CHF (252000 EUR) pour élaborer le SME et 155000 CHF (106000 EUR) par an pour le faire fonctionner.

¹ cf. Dyllick et Hamschmidt (2000, 73) cités par H. Klemisch et R. Holger, *Umweltmanagementsysteme in kleinen und mittleren Unternehmen - Befunde bisheriger Umsetzung*, KNI Papers 01/02, janvier 2002, p. 15; J. Clausen, M. Keil et M. Jungwirth, *The State of EMAS in the EU. Eco-Management as a Tool for Sustainable Development - Literature Study*, Institut de recherche écologique et économique (Berlin) et Ecologic, Institut de recherche en politique environnementale européenne et internationale (Berlin), 2002, p. 15.

Ces moyennes chiffrées ne représentent pas nécessairement le coût réel pour tel ou tel site industriel, ce coût dépendant aussi en grande partie du nombre de données importantes (polluants, consommation énergétique) et de la complexité des problèmes étudiés.

Une récente étude allemande (Stefan Schaltegger et Marcus Wagner, *Umweltmanagement in deutschen Unternehmen - der aktuelle Stand der Praxis*, février 2002, p. 106) montre les coûts suivants du système EMAS pour différentes branches. On notera que ces chiffres sont nettement inférieurs à ceux de l'étude suisse précitée, ce qui confirme combien il est difficile de déterminer les coûts d'un SME.

Coûts de l'élaboration (en EUR) :

minimum	- 18750
maximum	- 75000
moyen	- 50000

Coûts de la validation (en EUR) :

minimum	- 5000
maximum	- 12500
moyen	- 6000

Une étude réalisée par l'institut de l'entreprise allemand (Unternehmerinstitut/Arbeitsgemeinschaft Selbständiger Unternehmer UNI/ASU, 1997, *Umweltmanagementbefragung - Öko-Audit in der mittelständischen Praxis - Evaluierung und Ansätze für eine Effizienzsteigerung von Umweltmanagementsystemen in der Praxis*, Bonn.) donne des indications sur les économies moyennes réalisées par année pour un système EMAS et sur le délai moyen d'amortissement. Par exemple, pour un coût de mise en œuvre de 80000 EUR, l'étude a déterminé une économie moyenne de 50000 EUR par an, ce qui correspond à un délai d'amortissement d'environ un an et demi.

Les coûts externes liés à la vérification du système peuvent être estimés à partir des lignes directrices données par l'International Accreditation Forum (<http://www.iaf.nu>).

Elément moteur de la mise en œuvre

Un système de management environnemental peut procurer un certain nombre d'avantages, par exemple :

- une meilleure connaissance des aspects environnementaux de l'entreprise
- une meilleure base pour la prise de décisions
- une meilleure motivation du personnel
- des occasions supplémentaires de réduire les coûts d'exploitation et d'améliorer la qualité des produits
- de meilleures performances environnementales
- une meilleure image de marque de la société
- une réduction des coûts associés à la responsabilité civile, à l'assurance et aux non conformités
- une meilleure attractivité pour les salariés, les clients et les investisseurs
- une confiance accrue de la part des régulateurs, susceptible d'entraîner une réduction du contrôle réglementaire
- de meilleures relations avec les groupes écologistes.

Installations types

Les éléments énoncés ci-dessus aux points (a) à (e) sont des éléments de la norme EN ISO 14001:2004 et du système de management environnemental et d'audit de l'union européenne (EMAS), les éléments (f) et (g) étant quant à eux propres à l'EMAS. Ces deux systèmes normalisés sont appliqués dans un certain nombre d'installations IPPC. A titre d'exemple, 357 organisations appartenant à l'industrie chimique de l'UE (NACE, code 24) ont été enregistrées EMAS en juillet 2002, la plupart d'entre elles exploitant des installations IPPC.

Au Royaume-Uni, l'agence pour l'environnement de l'Angleterre et du Pays de Galle a réalisé un sondage parmi les installations réglementées par l'IPC (précurseur de l'IPPC) en 2001. Cette étude a montré que 32 % des entreprises ayant répondu étaient certifiées ISO 14001 (soit 21 % de toutes les installations IPC) et que 7 % étaient enregistrées EMAS. La totalité des cimenteries du Royaume-Uni (une vingtaine) sont certifiées ISO 14001 et la majorité d'entre elles sont enregistrées EMAS. En Irlande, où l'établissement d'un SME (pas nécessairement à caractère normalisé) est obligatoire pour la délivrance d'une autorisation IPC, on estime que 100 des 500 installations autorisées ont établi un SME selon ISO 14001, les 400 autres installations ayant opté pour un SME non normalisé.

Documents de référence

(Règlement CE N° 761/2001 du Parlement européen et du Conseil permettant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS), JO L 114, 24/4/2001, http://europa.eu.int/comm/environment/emas/index_en.htm)

(EN ISO 14001:2004, <http://www.iso.ch/iso/en/iso9000-14000/iso14000/iso14000index.html>; <http://www.tc207.org>)

5 MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES

Pour la compréhension du présent chapitre et de son contenu, le lecteur est invité à nouveau à se reporter à la préface du présent document et en particulier, à la cinquième partie de cette dernière, intitulée « Compréhension et utilisation du présent document ». Les techniques, ainsi que les niveaux ou les plages de niveaux d'émission et/ou de consommation associés qui sont présentés dans ce chapitre, ont été évalués par un procédé itératif impliquant les étapes suivantes :

- recensement des principales questions environnementales de l'industrie de la céramique
- étude des techniques les plus adaptées à la résolution de ces questions-clés
- identification des meilleurs niveaux de performance en matière d'environnement, sur la base des données disponibles au sein de l'Union européenne et dans le monde
- étude des conditions dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints ; par exemple, les coûts, les effets inter-milieux et les principaux moteurs de la mise en œuvre de ces techniques
- sélection des « meilleures techniques disponibles » (MTD) et des niveaux associés d'émission et/ou de consommation pour l'industrie de la céramique au sens général, le tout conformément à l'article 2(11) et à l'annexe IV de la Directive.

L'avis d'expert émis par le bureau européen pour la prévention et la réduction intégrées de la pollution et par le groupe de travail technique (GTT) concerné a joué un rôle déterminant pour chacune de ces étapes et pour la présentation des informations dans le présent document.

Sur la base de cette évaluation, ce chapitre présente des techniques et, si possible, des niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD, qui sont considérés comme étant appropriés pour l'industrie de la céramique dans son ensemble et qui indiquent souvent les performances actuelles de certaines installations au sein de l'industrie. Lorsque des niveaux d'émission et de consommation « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales auxquelles on peut s'attendre par suite de l'application, dans cette industrie, des techniques décrites, compte tenu de l'équilibre entre les coûts et les avantages, propre à la définition des MTD. Toutefois, ces niveaux ne sont pas des valeurs limites d'émission ou de consommation, et ne doivent pas être considérés comme telles. Dans certains cas, il serait possible techniquement d'atteindre de meilleurs niveaux d'émission ou de consommation, mais en raison des coûts associés ou des considérations d'effets inter-milieux, ceux-ci ne sont pas considérés comme appropriés en tant que MTD pour l'industrie de la céramique dans son ensemble. En revanche, ces niveaux peuvent être considérés comme justifiés dans des cas plus spécifiques, où il existe des éléments moteurs particuliers.

Les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD doivent être systématiquement associés aux conditions de référence éventuellement indiquées (par ex. périodes de moyennage).

Il convient de distinguer la notion de « niveaux associés aux MTD » évoquée ci-dessus, du terme « niveau réalisable » employé ailleurs dans le présent document. Lorsqu'un niveau est décrit comme étant « réalisable » au moyen de telle ou telle technique ou combinaison de techniques, cela signifie que ce niveau est susceptible de pouvoir être atteint, grâce à ces techniques, sur une période substantielle et dans une installation ou un procédé correctement entretenus et exploités.

Lorsqu'elles existaient, les données relatives aux coûts ont été indiquées en même temps que la description des techniques fournies au chapitre précédent. Elles donnent une indication approximative de l'ampleur des coûts induits. Toutefois, le coût réel d'application d'une technique va dépendre en grande partie de la situation spécifique concernant, par exemple, les taxes et les redevances, et des caractéristiques techniques de l'installation en question. Il est impossible d'évaluer ces facteurs inhérents au site de manière exhaustive dans ce document. En l'absence de données concernant les coûts, les conclusions quant à la viabilité économique des techniques sont établies à partir des observations faites sur des installations existantes.

Les MTD générales citées dans ce chapitre sont destinées à servir de référence pour l'évaluation des performances actuelles d'une installation existante ou pour juger une proposition concernant une nouvelle installation. Elles faciliteront ainsi la détermination des conditions appropriées reposant sur les MTD pour l'installation ou l'établissement des règles contraignantes générales conformément à l'article 9(8). Il est prévu que les nouvelles installations pourront être conçues pour fonctionner à des niveaux égaux, voire meilleurs, aux niveaux généraux MTD présentés ici. Il est également envisagé que les installations existantes pourront évoluer vers les niveaux généraux MTD, voire faire mieux, sous réserve de l'applicabilité technique et économique de ces techniques dans chacun des cas.

Bien que les documents de référence sur les MTD ne fixent pas des normes juridiquement contraignantes, ils sont destinés à fournir des indications permettant d'éclairer les industriels, les Etats membres et le public sur les niveaux d'émission et de consommation atteignables grâce à l'utilisation des techniques indiquées. Les valeurs limites appropriées pour un cas spécifique devront être déterminées compte tenu des objectifs de la Directive IPPC et des considérations locales.

Dans le présent document, les conclusions en matière de MTD pour l'industrie de la céramique sont présentées à deux niveaux. La section 5.1 présente les conclusions génériques en matière de MTD, c'est-à-dire celles qui peuvent généralement s'appliquer à l'industrie céramique dans son ensemble. La section 5.2 contient des conclusions spécifiques en matière de MTD pour chacun des neuf principaux secteurs concernés. Les « meilleures techniques disponibles » pour telle ou telle installation consisteront généralement à utiliser, individuellement ou en combinaison, les techniques et mesures présentées dans ce chapitre, sous les sections générique et spécifique à un secteur (sections 5.1 et 5.2).

Lorsque des techniques recensées individuellement comme relevant des MTD peuvent être utilisées en combinaison, il convient, dans certains cas particuliers, de tenir compte des effets de ces combinaisons pour établir des conclusions sur les conditions d'autorisation reposant sur les MTD.

Recommandations à l'intention des utilisateurs/lecteurs du présent document :

Il est fortement recommandé de lire le chapitre 5 conjointement avec le chapitre 4, car il faut tenir compte, non seulement de l'applicabilité des techniques et des mesures mentionnées au chapitre 4 mais également des restrictions concernant cette applicabilité. Pour aider le lecteur, des références au chapitre 4 ont été incluses dans le chapitre 5.

En ce qui concerne les conditions standard des mesures de débits volumétriques et de concentrations, le lecteur pourra se reporter aux définitions suivantes, qui figurent également au glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, les débits volumétriques correspondent à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des effluents gazeux secs à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal et les concentrations en benzène correspondent à 15 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
état normal	désigne une température de 273 K et une pression de 1013 hPa.

Il convient encore une fois de souligner que, comme l'explique la PREFACE, ce document ne propose pas de valeurs limites d'émissions. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de 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 amélioration. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent

de faire des compromis entre différents types d'incidences sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra pas les traiter tous de manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés au chapitre 5 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 transfrontières, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que toutes les informations présentées dans le présent document soient prises en compte.

5.1 Meilleures techniques disponibles génériques

Cette section contient des conclusions générales sur les MTD concernant l'ensemble des neuf secteurs présentés et décrits dans ce document. Les « meilleures techniques disponibles » pour telle ou telle installation consistent généralement à utiliser, individuellement ou en combinaison, les techniques et mesures recensées dans cette section générique et dans les sections spécifiques à un secteur (section 5.2).

Les meilleures techniques disponibles et les plages de niveaux d'émission ou de consommation associés aux meilleures techniques disponibles qui sont présentées concernent des installations ayant différentes dimensions de fours, différents types de fonctionnement des fours, par exemple discontinu ou continu, et différents horaires d'exploitation par an. Il est impossible de prendre totalement en compte les considérations locales spéciales. Le niveau d'émission associé aux MTD ne définit et ne propose en aucun cas des valeurs limites d'émission (VLE).

Il est fortement recommandé de lire le chapitre 5 conjointement avec le chapitre 4, car il convient de tenir compte, non seulement de l'applicabilité mais également des restrictions concernant l'applicabilité des techniques et des mesures mentionnées au chapitre 4. Les conclusions sur les MTD du présent chapitre 5 ne peuvent être correctement interprétées sans une lecture conjointe du chapitre 4. Pour aider le lecteur, des renvois au chapitre 4 ont été inclus dans le chapitre 5.

5.1.1 Management environnemental

Un certain nombre de techniques de management environnemental sont déterminées comme MTD. L'étendue (par ex. le niveau de détail) et le caractère du SME (par ex. normalisé ou non normalisé) sont généralement liés à la nature, à l'échelle et à la complexité de l'installation, ainsi qu'à l'ampleur de ses éventuels impacts environnementaux.

La démarche MTD consiste à mettre en œuvre et à respecter un système de management environnemental (SME) qui intègre, en fonction des circonstances individuelles, les éléments suivants (voir section 4.7) :

- a) définition d'une politique environnementale pour l'installation par la direction générale (l'engagement de la direction générale est considéré comme une condition préalable au succès de l'application d'autres éléments du SME)
- b) planification et établissement des procédures nécessaires
- c) mise en œuvre des procédures, axée plus particulièrement sur les points suivants :
 - I. structure et responsabilité
 - II. formation, sensibilisation et compétence
 - III. communication
 - IV. engagement des salariés
 - V. documentation
 - VI. commande efficace des procédés
 - VII. programme de maintenance
 - VIII. préparation et réaction aux situations d'urgence
 - IX. assurance du respect de la législation environnementale.

- d) contrôle des performances et adoption de mesures correctives, axé plus particulièrement sur les points suivants :
 - I. contrôle et mesures (voir le document de référence sur le contrôle des émissions)
 - II. actions correctives et préventives
 - III. tenue des documents
 - IV. réalisation d'audits internes indépendants (si possible) pour déterminer si le système de management environnemental est conforme ou non aux dispositions prévues et s'il a été correctement mis en œuvre et entretenu.
- e) examen par la direction générale.

Trois autres éléments pouvant venir progressivement en complément des étapes ci-dessus, sont considérés comme des mesures de soutien. Toutefois, leur absence n'est généralement pas incompatible avec les MTD. Ces trois étapes supplémentaires sont les suivantes :

- f) examen et validation du système de management et de la procédure d'audit par un organisme de certification agréé ou par un vérificateur de SME extérieur
- g) élaboration et publication (voire validation extérieure) d'une déclaration environnementale régulière décrivant tous les aspects environnementaux les plus importants de l'installation, autorisant ainsi une comparaison année après année par rapport aux cibles et objectifs environnementaux, ainsi qu'aux éventuels critères de référence sectoriels
- h) mise en œuvre et respect d'un système volontaire accepté au plan international tel que l'EMAS et l'ISO 14001:2004. Cette démarche volontaire pourrait conférer davantage de crédibilité au SME. Le système EMAS, qui regroupe tous les éléments susmentionnés, lui confère en particulier une plus grande crédibilité. Cela dit, des systèmes non normalisés peuvent théoriquement se montrer tout aussi efficaces, à condition qu'ils soient correctement conçus et mis en œuvre.

En ce qui concerne l'industrie céramique en particulier, il importe également de prendre en considération les caractéristiques potentielles suivantes du SME :

- i) l'impact environnemental d'une mise à l'arrêt tôt ou tard de l'unité, lors de la phase de conception d'une nouvelle installation
- j) le développement de technologies plus propres
- k) si possible, l'application régulière d'analyses comparatives sectorielles, portant notamment sur les activités d'efficacité énergétique et de conservation de l'énergie, sur le choix des matériaux d'entrée, sur les émissions dans l'air, sur les rejets dans l'eau, sur la consommation d'eau et sur la production de déchets.

5.1.2 Consommation d'énergie

Des considérations générales concernant la consommation d'énergie sont présentées à la section 3.2.1.

- a) **la démarche MTD consiste à réduire la consommation d'énergie en appliquant une combinaison des techniques suivantes :**
 - I. amélioration de la conception des fours et des séchoirs. A ce sujet, voir la section 4.1.1, qui présente un certain nombre de mesures différentes pouvant être appliquées à des systèmes de four/séchoir, individuellement ou en combinaison
 - II. récupération de la chaleur résiduelle provenant des fours, et notamment de leur zone de refroidissement (voir section 4.1.2). En particulier, la chaleur résiduelle émanant de la zone de refroidissement sous forme d'air chaud peut servir à chauffer les séchoirs
 - III. mise en place d'un changement de combustible dans le procédé de cuisson au four (remplacement du fioul lourd et des combustibles solides par des combustibles peu polluants). A ce sujet, voir la section 4.1.4, qui traite du passage du procédé de cuisson au four aux combustibles gazeux ou au fioul extraléger
 - IV. modification des pâtes céramiques. A ce sujet, voir la section 4.1.5, qui présente plusieurs possibilités de modification des pâtes céramiques et leur applicabilité.
- b) **la démarche MTD consiste à réduire la consommation d'énergie en utilisant la centrales de cogénération/centrales combinées d'électricité et de chaleur (voir section 4.1.3), en fonction de la demande en chaleur utile et dans le cadre de schémas réglementaires énergétiques qui soient économiquement viables.**

5.1.3 Emissions de poussières

Des considérations générales concernant les émissions de poussières sont présentées à la section 3.1.1.1.

5.1.3.1 Emissions diffuses de poussières

La démarche MTD consiste à réduire les émissions diffuses de poussières en appliquant une combinaison des techniques suivantes :

- a) des mesures pour les opérations génératrices de poussière. A ce sujet, voir la section 4.2.1, où sont présentées plusieurs mesures différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison
- b) des mesures pour le stockage en vrac. A ce sujet, voir la section 4.2.2, où sont présentées plusieurs mesures différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison.

5.1.3.2 Emissions canalisées de poussières dues à des opérations génératrices de poussières

Emissions de poussières résultant d'opérations génératrices de poussières autres que le séchage, le séchage par atomisation ou la cuisson.

La démarche MTD consiste à réduire les émissions diffuses de poussières dues aux activités génératrices de poussières (voir la section 4.2.3, où sont décrites des techniques visant presque exclusivement à supprimer les poussières) dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2). Toutefois, cette plage peut être plus élevée, en fonction des conditions spécifiques d'exploitation.

5.1.3.3 Emissions de poussières dues aux procédés de séchage

Emissions de poussières résultant des procédés de séchage.

La démarche MTD consiste à maintenir les émissions de poussières dues aux procédés de séchage dans une plage de 1 à 20 mg/m³ correspondant à la valeur moyenne journalière, en nettoyant le séchoir, en évitant l'accumulation de résidus de poussières dans le séchoir et en adoptant des protocoles d'entretien adéquats (voir section 4.2).

5.1.3.4 Emissions de poussières dues aux procédés de cuisson au four

Emissions de poussières résultant des procédés de cuisson au four.

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de poussières (particules) dues aux effluents gazeux des procédés de cuisson au four dans une plage de 1 à 20 mg/m³ correspondant à la valeur moyenne journalière, en utilisant une combinaison des mesures/techniques primaires suivantes :

- a) utilisation de combustibles à faible teneur en cendres, par ex. le gaz naturel, le GNL, le GPL et le fioul extraléger (voir section 4.1.4)
- b) minimisation de la formation de poussière engendrée par le chargement des produits destinés à être cuits au four (voir section 4.2).

Lorsqu'on utilise une épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre (voir section 4.3.4.3), un niveau d'émission de poussières inférieur à 20 mg/m³ dans les effluents gazeux épurés correspond aux MTD (niveau d'émission associé aux MTD).

Lorsqu'on utilise des adsorbants à lit à garnissage de type cascade (voir section 4.3.4.1), un niveau d'émission de poussières inférieur à 50 mg/m³ dans les effluents gazeux épurés correspond aux MTD (niveau d'émission associé aux MTD).

Pour les granulats d'argile expansée, se reporter aux MTD spécifiques au secteur (section 5.2.4).

5.1.4 Composés gazeux

Des considérations générales concernant les émissions de composés gazeux sont présentées à la section 3.1.1.2.

5.1.4.1 Mesures/techniques primaires

- a) **La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés gazeux (c'est-à-dire HF, HCl, SO_x, COV, métaux lourds) présents dans les effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en appliquant, individuellement ou en combinaison, une ou plusieurs des mesures/techniques primaires suivantes :**
 - I. réduction de l'apport de précurseurs de polluants. A ce sujet, voir la section 4.3.1, où sont présentées plusieurs possibilités de réduction de l'apport de différents précurseurs de polluants
 - II. optimisation de la courbe de chauffage. A ce sujet, voir la section 4.3.3.1, où sont présentés plusieurs aspects de l'optimisation des procédés consistant à optimiser la courbe de chauffage du procédé de cuisson.
- b) **La démarche MTD consiste à maintenir les émissions de NO_x provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en dessous de 250 mg/m³, valeur moyenne journalière en équivalent NO₂, pour des températures de four inférieures à 1300 °C, ou en dessous de 500 mg/m³, valeur moyenne journalière en équivalent NO₂, pour des températures de four supérieures ou égales à 1300 °C, en utilisant une combinaison de mesures/techniques primaires (voir sections 4.3.1 et 4.3.3, et en particulier la réduction de l'apport des précurseurs de NO_x), sauf pour les granulats d'argile expansée.**
- c) **La démarche MTD consiste à maintenir les émissions de NO_x provenant des effluents gazeux rejetés par les moteurs de cogénération en dessous de 500 mg/m³, valeur moyenne journalière en équivalent NO₂, en appliquant des mesures d'optimisation de procédé (voir sections 4.1.3 et 4.3.1).**

5.1.4.2 Mesures/techniques secondaires et combinées avec des mesures/techniques primaires

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés inorganiques gazeux présents dans les effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en appliquant une des mesures/techniques secondaires suivantes :

- a) adsorbants à lit à garnissage de type cascade (voir section 4.3.4.1)
- b) épuration des effluents gazeux par voie sèche au moyen d'un filtre (filtre à manches ou électrofiltre, voir section 4.3.4.3)

Lorsqu'on applique une combinaison des mesures/techniques primaires énoncées à la section 5.1.4.1.a et/ou des mesures/techniques secondaires énoncées dans la présente section, les niveaux d'émission suivants de composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux des procédés de cuisson au four correspondent aux niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles :

Paramètre	Unité, comme valeur moyenne journalière	Niveau d'émission associé aux MTD ¹⁾
Fluorure en équivalent HF	mg/m ³	1- 10 ²⁾
Chlorure en équivalent HCl	mg/m ³	1- 30 ³⁾
SO _x en équivalent SO ₂ teneur en soufre de la matière première ≤0,25 %	mg/m ³	<500
SO _x en équivalent SO ₂ teneur en soufre de la matière première ≤0,25 %	mg/m ³	500 - 2000 ⁴⁾
¹⁾ Les plages dépendent de la quantité du polluant (précurseur) contenue dans les matières premières ; ainsi, pour les procédés de cuisson de produits céramiques ayant une faible quantité du polluant (précurseur) dans les matières premières, les niveaux inférieurs de la plage correspondent aux MTD et pour les procédés de cuisson de produits céramiques ayant une grande quantité du polluant (précurseur) dans les matières premières, les niveaux supérieurs de la plage correspondent aux niveaux d'émission associés aux MTD.		
²⁾ Le niveau supérieur MTD peut être plus bas en fonction des caractéristiques de la matière première.		
³⁾ Le niveau supérieur MTD peut être plus bas en fonction des caractéristiques de la matière première. Par ailleurs, un niveau plus élevé d'émissions associées aux MTD ne doit pas empêcher la réutilisation des eaux usées.		
⁴⁾ Le niveau supérieur MTD s'applique uniquement à une matière première dont la teneur en soufre est extrêmement élevée.		

Tableau 5.1 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux des procédés de cuisson au four

5.1.5Eaux de process (émissions et consommation)

Des considérations générales concernant les eaux de process (émissions et consommation) sont présentées à la section 3.1.2 et à la section 3.2.2.

- La démarche MTD consiste à réduire la consommation d'eau en appliquant des mesures d'optimisation de procédé. A ce sujet, voir la section 4.4.5.1 où sont présentées plusieurs mesures d'optimisation de procédé pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison.**
- La démarche MTD consiste à nettoyer les eaux de process en utilisant des systèmes de traitement des eaux de process. A ce sujet, voir la section 4.4.5.2 où sont présentés plusieurs systèmes de traitement des eaux de process, que l'on peut appliquer individuellement ou en combinaison pour s'assurer que l'eau est suffisamment épurée pour pouvoir être réutilisée dans le procédé de fabrication ou pour être évacuée directement, dans l'eau, ou indirectement, dans un réseau municipal d'assainissement des eaux usées.**
- La démarche MTD consiste à réduire la charge d'émission de polluants dans les rejets d'eaux usées. Les niveaux d'émission suivants dans les rejets d'eaux usées correspondent aux niveaux d'émission associés aux MTD :**

Paramètre	Unité	Niveau d'émission associé aux MTD (échantillon composite de 2 heures)
Matières en suspension	mg/l	50,0
AOX	mg/l	0,1
Plomb (Pb)	mg/l	0,3
Zinc (Zn)	mg/l	2,0
Cadmium (Cd)	mg/l	0,07

Tableau 5.2 : Niveaux d'émission de polluants associés aux MTD dans les rejets d'eaux usées

Si plus de 50 % de l'eau de process est réutilisée dans les procédés de fabrication, des concentrations plus élevées de ces polluants peuvent toujours correspondre aux niveaux d'émission associés aux MTD, à condition que la charge spécifique en polluant par quantité produite (kg de matière première traitée) ne soit pas supérieure à la charge en polluant résultant d'un taux de recyclage de l'eau inférieur à 50 %.

5.1.6Boues

Des considérations générales concernant les boues sont présentées à la section 3.1.3.

La démarche MTD consiste à recycler/réutiliser les boues en appliquant une des techniques suivantes, individuellement ou en combinaison :

- a) systèmes de recyclage des boues (voir section 4.5.1.1)
- b) réutilisation des boues dans d'autres produits (voir section 4.5.1.2).

5.1.7Déchets de production solides

Des considérations générales concernant les déchets de production solides sont présentées à la section 3.1.3.

La démarche MTD consiste à réduire les déchets de production solides en appliquant une combinaison des techniques suivantes :

- a) réintroduction des matières premières non malaxées (voir section 4.5.2.1)
- b) réintroduction des déchets de casse dans le procédé de fabrication (voir section 4.5.2.1)
- c) utilisation des déchets de production solides dans d'autres industries (voir section 4.5.2.1)
- d) commande électronique de la cuisson (voir section 4.5.2.2)
- e) mise en place d'un enfournement optimisé (voir section 4.5.2.2).

5.1.8Bruit

Des considérations générales concernant le bruit sont présentées à la section 3.1.4.

La démarche MTD consiste à réduire le bruit en appliquant une combinaison des techniques suivantes (voir section 4.6) :

- a) capotage des unités
- b) isolation des unités contre les vibrations
- c) utilisation de silencieux et de ventilateurs à rotation lente
- d) implantation des fenêtres, portes et unités bruyantes à l'écart du voisinage
- e) insonorisation des fenêtres et des murs
- f) fermeture des fenêtres et des portes
- g) exercice des activités bruyantes (extérieures) uniquement pendant la journée
- h) bonne maintenance de l'installation.

5.2 Meilleures techniques disponibles spécifiques à un secteur

Cette section contient des conclusions spécifiques sur les MTD concernant chacun des neuf secteurs présentés et décrits dans ce document. Les "meilleures techniques disponibles" pour telle ou telle installation consistent généralement à utiliser, individuellement ou en combinaison, les techniques et mesures recensées dans cette section spécifique au secteur et à la section générique (section 5.1).

Les meilleures techniques disponibles et les plages de niveaux d'émission ou de consommation associés aux meilleures techniques disponibles qui sont présentées concernent des installations ayant différentes dimensions de fours, différents types de fonctionnement des fours, par exemple discontinu ou continu, et différents horaires d'exploitation par an. Il est impossible de prendre totalement en compte les considérations locales spéciales. Le niveau d'émission associé aux MTD ne définit et ne suggère en aucun cas des valeurs limites d'émission (VLE).

Il est fortement recommandé de lire le chapitre 5 conjointement avec le chapitre 4, car il convient de tenir compte non seulement de l'applicabilité mais également des restrictions concernant l'applicabilité des techniques et des mesures mentionnées au chapitre 4. Les conclusions sur les MTD du présent chapitre 5 ne peuvent être correctement interprétées si ce chapitre n'est pas lu conjointement avec le chapitre 4. Pour aider le lecteur, des renvois au chapitre 4 ont été inclus dans le chapitre 5.

5.2.1 Briques et tuiles

5.2.1.1 Composés gazeux/mesures/techniques primaires

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés gazeux (c'est-à-dire HF, HCl, SO_x) provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four par l'ajout d'additifs riches en calcium (voir section 4.3.2), si cela ne nuit pas à la qualité du produit final.

5.2.1.2 Composés organiques volatils

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils issus des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson - avec des concentrations en gaz brut de plus de 100 à 150 mg/m³, en fonction des caractéristiques du gaz brut, notamment sa composition, sa température - dans une plage de 5 à 20 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière exprimée en C total, en appliquant une postcombustion thermique dans un thermoréacteur à une chambre ou à trois chambres (voir section 4.3.5.1).

5.2.2 Tuyaux en grès

5.2.2.1 Emissions canalisées de poussières

La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés d'émaillage par pulvérisation dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2) ou des filtres lamellaires frittés (voir section 4.2.3.3).

5.2.3 Produits réfractaires

5.2.3.1 Composés organiques volatils

- a) La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils dans de faibles volumes d'effluents gazeux issus du traitement avec des composés organiques en utilisant des filtres à charbon actif (voir section 4.3.4.5). Pour les volumes d'effluents gazeux importants, la démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils issus du traitement avec des composés organiques, en appliquant une postcombustion thermique (voir section 4.3.5.1) dans une plage de 5 à 20 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière exprimée en C total.

- b) La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils issus des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson - avec des concentrations en gaz brut de plus de 100 à 150 mg/m³, en fonction des caractéristiques du gaz brut, notamment sa composition, sa température - dans une plage de 5 à 20 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière exprimée en C total, en appliquant une postcombustion thermique dans un thermoréacteur à une chambre ou à trois chambres (voir section 4.3.5.1).

5.2.3.2 Déchets de production solides

La démarche MTD consiste à réduire la quantité de déchets de production solides sous forme de moules en plâtre usagés issus des procédés de façonnage, en appliquant une des mesures suivantes ou une combinaison de celles-ci (voir section 4.5.2.2) :

- a) remplacement des moules en plâtre par des moules en polymère
- b) remplacement des moules en plâtre par des moules en métal
- c) utilisation de mélangeurs à plâtre sous vide
- d) réutilisation des moules en plâtre usagés dans d'autres industries.

5.2.4 Granulats d'argile expansée

5.2.4.1 Emissions canalisées de poussières

La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux effluents gazeux chauds dans une plage de 5 à 50 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière, en utilisant des électrofiltres (voir section 4.2.3.5) ou des dépoussiéreurs humides (voir section 4.2.3.4).

5.2.4.2 Composés gazeux/mesures/techniques primaires

La démarche MTD consiste à maintenir les émissions de NO_x provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four rotatif en dessous de 500 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière en équivalent NO₂, en appliquant une combinaison de mesures/techniques primaires (voir sections 4.3.1 et 4.3.3).

5.2.5 Carreaux pour sols et murs

5.2.5.1 Emissions canalisées de poussières

- a) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés de séchage par atomisation dans une plage de 1 à 30 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2), ou dans une plage de 1 à 50 mg/m³ en utilisant des cyclones (voir section 4.2.3.1) associés à des dépoussiéreurs humides (voir section 4.2.3.4) pour les installations existantes, si l'eau de rinçage peut être réutilisée.
- b) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés d'émaillage par pulvérisation dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2) ou des filtres lamellaires frittés (voir section 4.2.3.3).

5.2.5.2 Emissions de poussières dues aux procédés de cuisson au four

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de poussières (particules) dues aux effluents gazeux des procédés de cuisson au four dans une plage de 1 à 5 mg/m³ correspondant à la valeur moyenne journalière, en appliquant une épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches (voir section 4.3.4.3), ce qui sert également à l'élimination du fluorure.

5.2.5.3 Composés gazeux/mesures/techniques secondaires

- a) La démarche MTD consiste à réduire les émissions de HF provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four dans une plage 1 à 5 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière, en appliquant, par exemple, l'épuration des effluents gazeux par voie sèche avec un filtre à manches (voir section 4.3.4.3).
- b) La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en utilisant des adsorbants modulaires (voir section 4.3.4.2), notamment pour des débits de effluents gazeux relativement bas (inférieurs à 18000 m³/h) et lorsque les concentrations en gaz brut des composés inorganiques autres que HF (SO₂, SO₃, HCl) et des poussières sont faibles.

5.2.5.4 Réutilisation des eaux de process

La démarche MTD consiste à réutiliser les eaux de process dans le procédé de fabrication avec des taux de recyclages d'eaux de process de 50 à 100 % (selon le type de carreau à fabriquer, voir section 4.4.5.1), en appliquant une combinaison de mesures d'optimisation de procédé et de systèmes de traitement des eaux de process, comme l'indique la section 4.4.5.

5.2.5.5 Réutilisation des boues

La démarche MTD consiste à réutiliser les boues issues du traitement des eaux de process dans le procédé de préparation de la pâte céramique selon un taux de 0,4 à 1,5 % par poids de boues sèches ajoutées à la pâte céramique, en appliquant, le cas échéant, un système de recyclage des boues (voir section 4.5.1.1).

5.2.6 Céramiques ornementales (céramiques domestiques)

5.2.6.1 Emissions canalisées de poussières

- a) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés de séchage par atomisation dans une plage de 1 à 30 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2), ou dans une plage de 1 à 50 mg/m³ en utilisant des cyclones (voir section 4.2.3.1) associés à des dépoussiéreurs humides (voir section 4.2.3.4) pour les installations existantes, si l'eau de rinçage peut être réutilisée.
- b) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés d'émaillage par pulvérisation dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2) ou des filtres lamellaires frittés (voir section 4.2.3.3).

5.2.6.2 Composés gazeux/techniques/mesures secondaires

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en utilisant des adsorbants modulaires (voir section 4.3.4.2), notamment pour des débits d'effluents gazeux relativement bas (inférieurs à 18000 m³/h) et lorsque les concentrations en gaz brut des composés inorganiques autres que HF (SO₂, SO₃, HCl) et des poussières sont faibles

5.2.6.3 Réutilisation des eaux de process

La démarche MTD consiste à réutiliser les eaux de process dans le procédé de fabrication avec des taux de recyclages d'eaux de process de 30 à 50 % en appliquant une combinaison de mesures d'optimisation de procédé et de systèmes de traitement des eaux de process, comme l'indique la section 4.4.5.

5.2.6.4 Déchets de production solides :

La démarche MTD consiste à réduire la quantité de déchets de production solides sous forme de moules en plâtre usagés issus des procédés de façonnage, en appliquant une des mesures suivantes ou une combinaison de celles-ci (voir section 4.5.2.2) :

- a) remplacement des moules en plâtre par des moules en polymère
- b) remplacement des moules en plâtre par des moules en métal
- c) utilisation de mélangeurs à plâtre sous vide
- d) réutilisation des moules en plâtre usagés dans d'autres industries.

5.2.7 Appareils sanitaires

5.2.7.1 Emissions canalisées de poussières

La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés d'émaillage par pulvérisation dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2) ou des filtres lamellaires frittés (voir section 4.2.3.3).

5.2.7.2 Composés gazeux/mesures/techniques secondaires

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en utilisant des adsorbants modulaires (voir section 4.3.4.2), notamment pour des débits d'effluents gazeux relativement bas (inférieurs à 18000 m³/h) et lorsque les concentrations en gaz brut des composés inorganiques autres que HF (SO₂, SO₃, HCl) et des poussières sont faibles.

5.2.7.3 Réutilisation des eaux de process

La démarche MTD consiste à réutiliser les eaux de process dans le procédé de fabrication avec des taux de recyclages d'eaux de process de 30 à 50 % en appliquant une combinaison de mesures d'optimisation de procédé et de systèmes de traitement des eaux de process, comme l'indique la section 4.4.5.

5.2.7.4 Déchets de production solides

La démarche MTD consiste à réduire la quantité de déchets de production solides sous forme de moules en plâtre usagés issus des procédés de façonnage, en appliquant une des mesures suivantes ou une combinaison de celles-ci (voir section 4.5.2.2) :

- a) remplacement des moules en plâtre par des moules en polymère
- b) remplacement des moules en plâtre par des moules en métal
- c) utilisation de mélangeurs à plâtre sous vide
- d) réutilisation des moules en plâtre usagés dans d'autres industries.

5.2.8 Céramiques techniques

5.2.8.1 Emissions canalisées de poussières

- a) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés de séchage par atomisation dans une plage de 1 à 30 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2), ou dans une plage de 1 à 50 mg/m³ en utilisant des cyclones (voir section 4.2.3.1) associés à des dépoussiéreurs humides (voir section 4.2.3.4) pour les installations existantes, si l'eau de rinçage peut être réutilisée.

- b) La démarche MTD consiste à réduire les émissions canalisées de poussières dues aux procédés d'émaillage par pulvérisation dans une plage de 1 à 10 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne par demi-heure, en utilisant des filtres à manches (voir section 4.2.3.2) ou des filtres lamellaires frittés (voir section 4.2.3.3).

5.2.8.2 Composés gazeux/mesures/techniques secondaires

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés inorganiques gazeux provenant des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson au four en utilisant des adsorbants modulaires (voir section 4.3.4.2), notamment pour des débits d'effluents gazeux relativement bas (inférieurs à 18000 m³/h) et lorsque les concentrations en gaz brut des composés inorganiques autres que HF (SO₂, SO₃, HCl) et des poussières sont faibles.

5.2.8.3 Composés organiques volatils

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils issus des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson - avec des concentrations en gaz brut de plus de 100 à 150 mg/m³, en fonction des caractéristiques du gaz brut, notamment sa composition, sa température - dans une plage de 5 à 20 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière exprimée en C total, en appliquant une postcombustion thermique dans un thermoréacteur à une chambre ou à trois chambres (voir section 4.3.5.1).

5.2.8.4 Déchets de production solides

La démarche MTD consiste à réduire la quantité de déchets de production solides sous forme de moules en plâtre usagés issus des procédés de façonnage, en appliquant une des mesures suivantes ou une combinaison de celles-ci (voir section 4.5.2.2) :

- a) remplacement des moules en plâtre par des moules en polymère
- b) remplacement des moules en plâtre par des moules en métal
- c) utilisation de mélangeurs à plâtre sous vide
- d) réutilisation des moules en plâtre usagés dans d'autres industries.

5.2.9 Abrasifs inorganiques

5.2.9.1 Composés organiques volatils

La démarche MTD consiste à réduire les émissions de composés organiques volatils issus des effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson - avec des concentrations en gaz brut de plus de 100 à 150 mg/m³, en fonction des caractéristiques du gaz brut, notamment sa composition, sa température - dans une plage de 5 à 20 mg/m³, correspondant à la valeur moyenne journalière exprimée en C total, en appliquant une postcombustion thermique dans un thermoréacteur à une chambre ou à trois chambres (voir section 4.3.5.1).

6 TECHNIQUES EMERGENTES POUR LA FABRICATION DES CERAMIQUES

6.1 Brûleurs à tube radiant

La réduction des taux de vapeur d'eau dans les gaz de four entraîne généralement une baisse des niveaux d'émission de fluorure, le mécanisme de base de la libération du fluorure par les minéraux argileux étant la pyrohydrolyse. Cette réaction se produit à des températures de 800 °C et plus.

Des essais en laboratoire ont montré qu'une réduction de la teneur en eau de l'atmosphère du four entraînait bien une réduction des émissions de HF, tout comme des émissions de SO_x . Dans la pratique, réduire la teneur en eau de l'atmosphère du four serait une opération difficile à réaliser au plan technique, l'eau étant produite par la combustion des combustibles fossiles utilisés pour chauffer le four. On peut éviter cette production d'eau en chauffant le four indirectement, avec des brûleurs à gaz à tube radiant [voir section 4.3.3.2).

Pour pouvoir être utilisés dans l'industrie céramique, ces brûleurs à tube radiant sont fabriqués dans un carbure de silicium à haute conductivité thermique et doté d'une haute résistance à la chaleur pour pouvoir résister à des températures extrêmement variables. Avec ces brûleurs à tube radiant, le four est chauffé de façon indirecte (à l'exception de sa zone de préchauffage) et la flamme du brûleur se trouve dans un tube résistant à la chaleur, où s'opère la combustion. Le transfert de chaleur du brûleur au procédé se fait principalement par rayonnement thermique, les valeurs élevées correspondant au flux de chaleur se situant dans une plage de 70 à 120 kW/m².

Les brûleurs à tube radiant peuvent en principe s'appliquer aux industries des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques, mais pour les secteurs de la briqueterie et de la tuilerie, des tuyaux en grès, des réfractaires et des granulats d'argile expansée, la fabrication est à trop grande échelle. Certains projets ont fait la preuve que ces brûleurs pouvaient être utilisés pour des fours à rouleaux et des fours intermittents, même si la technologie n'est pas encore éprouvée pour les fours tunnels.

Lors d'un projet pilote mené aux Pays-Bas, dans lequel un four à rouleaux avait été équipé de brûleurs à tube radiant pour la fabrication de carreaux pour sols et murs, on a observé des émissions de HF entre 0,7 mg/m³ (fabrication de carrelages muraux) et 1,2 mg/m³ (fabrication de carrelages pour sols), avec des coefficients d'émission spécifiques de HF entre 3 et 6 mg/kg. Les coûts supplémentaires liés au matériel des brûleurs à tube radiant et au fonctionnement d'un four d'une capacité de production de 500000 m² de carrelage par an ont été estimés à 450000 EUR [5, InfoMil, 2003].

6.2 Cuisson assistée par micro-ondes et séchoirs à micro-ondes

La cuisson ou le frittage des céramiques est une étape cruciale de la fabrication. Du fait des lourdes charges qui pèsent sur les wagonnets de four, les transferts de chaleur de l'extérieur vers le milieu de l'empilement et jusqu'au centre de chacune des briques s'opèrent difficilement. Les gradients de température peuvent provoquer des contraintes thermiques et endommager les produits, les températures de surface étant fréquemment plus élevées que celles qui règnent au centre du produit ou de l'empilement.

Des travaux de recherche considérables ont été menés sur l'application d'énergie sous forme de micro-ondes lors de la cuisson des céramiques. Ce processus chauffe les produits directement, y compris le centre des produits. Afin d'éviter les pertes de chaleur excessives dans la structure du four, on utilise l'énergie des micro-ondes en association avec un chauffage conventionnel tel que le gaz ou l'énergie électrique.

Avant de pouvoir appliquer le processus de façon économique sur des fours de fabrication à grande échelle, il reste à résoudre certains problèmes techniques, notamment les aspects sécuritaires, de même qu'il faut tenir compte des coûts de l'énergie électrique qui sont relativement élevés. Toutefois, des travaux expérimentaux ont mis en lumière un certain nombre d'avantages importants qu'il conviendra de développer à l'avenir.

- minimisation des contraintes thermiques sur l'ensemble du cycle de cuisson
- nette augmentation des débits de production, grâce à des cycles de cuisson beaucoup plus courts
- réduction importante de la consommation énergétique pour la cuisson - mais éventuellement moins de chaleur résiduelle disponible pour le séchage
- réduction des déchets de production solides
- améliorations en qualité, notamment des gains significatifs dans les propriétés mécaniques
- amélioration de l'élimination des liants (dans les produits réfractaires)
- réduction des émissions grâce à une consommation énergétique moindre et à une plus grosse production
- réduction des émissions de fluorure, étroitement liées au temps passé par le produit au-dessus de 800 °C.

En principe, l'énergie des micro-ondes peut également servir au séchage des céramiques (voir section 2.2.5.8). Les avantages et inconvénients recensés ci-dessus pour la cuisson valent également pour les procédés de séchage réalisés avec des fours à micro-ondes. Des recherches ont montré que le séchage assisté par micro-ondes ne pouvait s'appliquer aux produits de forme complexe, mais s'appliquait seulement à des formes minces [20, CERAME-UNIE, 2004] [28, Schorcht, 2005] [30, TWG Ceramics, 2005].

6.3 Nouveau type de système de séchage pour les produits réfractaires

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Le séchage d'éléments de construction réfractaires de taille importante tels que couvercles de poches ou voûtes de fours à arc électrique peut être très long et très gourmand en énergie. Le fait de placer des plaques d'acier inoxydable résistant à la chaleur (à des températures de chauffage pouvant atteindre 1100 °C) ou des fibres de carbone (à des températures de séchage moindres, inférieures à 250 °C) comme élément chauffant dans le mélange réfractaire qui doit être versé permet de sécher l'élément du centre vers la périphérie. Les plaques ou les fibres de carbone s'adaptent à la structure sans provoquer d'interférence.

Le séchage s'opérant du centre vers la périphérie, l'eau se déplace dans le même sens que le front de température, ce qui permet de réduire les durées de séchage de façon importante.

Le fait de contrôler la température de prise permet d'améliorer sensiblement la qualité des éléments de construction, ce qui donne un séchage plus uniforme, avec moins de fissures sèches et une meilleure stabilité structurelle. Les améliorations concernent les paramètres suivants :

- résistance à la pression à froid : + 50 %
- résistance à la flexion : + 50 %
- résistance à l'abrasion : + 70 %
- prolongement de la durée de fonctionnement : + 50 %.

Cette technique de séchage permet des économies d'énergie importantes, que l'on peut encore augmenter - notamment dans le cas de très gros éléments de construction - en isolant le produit réfractaire lors du séchage.

Effets inter-milieux

Sans objet.

Données opérationnelles et applicabilité

Les fibres de carbone peuvent s'utiliser à des températures pouvant atteindre environ 250 °C, et les plaques métalliques à des températures plus élevées, qui peuvent atteindre 1100 °C. Des essais réalisés sur un élément de construction de 9 tonnes ont montré que le besoin énergétique initial pour le séchage était de 77000 kWh sous une humidité résiduelle de 6 %. L'installation de plaques chauffantes et d'isolants lors du séchage a permis de réduire ce besoin énergétique à 2000 kWh, ce qui correspond à une économie d'énergie d'environ 97 %. Le temps de séchage a diminué d'environ cinq jours à environ trois jours.

Economie

Des économies importantes peuvent être réalisées en matière de coûts, notamment dans le cas de très gros éléments de construction pouvant peser jusqu'à 20 tonnes, grâce à la réduction de la consommation énergétique.

Éléments moteurs de la mise en œuvre

- qualité meilleure et durée de fonctionnement plus longue des éléments de construction
- économies de coût
- économies de temps.

Installations types et documents de référence

Cette technique est employée par plusieurs fabricants, par ex. Wolf GmbH, Urbar, Allemagne, [30, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics 2006].

6.4 Gestion avancée des eaux de process avec récupération intégrée de l'émail

Un système modèle innovant de traitement des eaux usées a été construit dans une usine de céramique, permettant d'importantes réductions des polluants et des économies dans la fabrication d'appareils sanitaires, de vaisselle et de carreaux pour sols et murs.

Ce nouveau circuit des eaux de process comporte cinq modules :

- microfiltration : les eaux de process issues du procédé d'émaillage le plus important (émail blanc, 80 % de la consommation totale en émail) passent à travers une centrale de microfiltration pour récupérer l'émail. L'émail récupéré est renvoyé dans le procédé de préparation de l'émail
- traitement d'un flux secondaire d'eaux de process : les eaux usées issues du procédé de préparation de la pâte destinée à la fabrication de carreaux pour sols et murs, qui sont de faible volume mais fortement polluées, passent par une centrale de traitement séparée. Les boues d'épuration résultantes, qui contiennent des éléments de haute qualité permettant d'augmenter l'aptitude au frittage de la pâte céramique, sont envoyées dans le procédé de préparation de la pâte tandis que les effluents sont envoyés vers la station municipale d'épuration des eaux usées pour que les constituants biodégradables soient éliminés
- intégration des bacs de sédimentation existants : les eaux de process issues de la préparation de l'émail passent par un système de bacs de sédimentation qui ont été mis à niveau grâce à des mesures supplémentaires et qui sont contrôlés automatiquement. Les boues d'épuration résultantes sont également renvoyées dans le procédé de préparation de la pâte destinée à la fabrication de carreaux pour sols et murs, tandis que les eaux de process passent par la nouvelle station de traitement des eaux de process, considérablement plus petite
- construction d'une nouvelle station centralisée de traitement des eaux de process : la station précédente de traitement des eaux de process pouvait traiter jusqu'à 3500 m³ d'eaux de process par jour. A cause des entrepôts aménagés dans la fabrique de carreaux pour sols et murs, lors de la construction de la première station de traitement des eaux usées, au début des années 1970, il était impossible de séparer les eaux pluviales et les eaux de process. La nouvelle station centralisée, qui représente la technologie la plus évoluée à l'heure actuelle, recueille les eaux de process provenant de l'usine et les envoie vers le nouveau système par pompage en surface, de sorte qu'il n'y a aucun mélange avec les eaux pluviales. Le réglage du volume des eaux de process à 700 - 800 m³/jour, la réduction des charges en polluants dans les flux d'eaux de process et une technologie améliorée ont permis de concevoir cette centrale comme une installation entièrement automatisée, dont le fonctionnement ne nécessite que 20 % des besoins initiaux en personnel et qui engendre des économies considérables d'énergie et de floculants. Une partie des boues d'épuration issues de cette centrale peuvent également être réutilisées dans la fabrication des carreaux. Sa charge en polluants étant plus faible, de même que sa teneur en eau (25 % maxi) grâce à un nouveau filtre-pressé à chambre, la partie résiduelle peut être stockée sans aucun risque sur le propre site d'élimination de déchets de l'usine. Des essais ont montré que ce matériau pouvait également servir d'élément de la couche d'étanchéité minérale dans des systèmes de couverture finale de décharge
- séparation des eaux pluviales : les eaux de process étant séparées du réseau d'assainissement souterrain, il est inutile d'entreprendre de coûteux travaux de modernisation des anciens égouts et conduits d'évacuation. La réduction et l'automatisation de l'utilisation de floculants laissent augurer des économies matérielles et financières considérables.

La refonte du système procure les bénéfices environnementaux suivants

- récupération de l'émail blanc et réutilisation de celui-ci dans le procédé
- réduction des quantités de déchets mis en décharge
- l'utilisation de biocides et de filtres à charbon actif désormais inutile
- traitement séparé des eaux de process fortement polluées
- recyclage in situ des boues d'épuration
- fractions d'eaux de process biologiquement polluées envoyées dans la station municipale de traitement des eaux usées
- aucun risque lié aux eaux de process polluées dans l'ancien réseau d'assainissement
- économies d'énergie grâce à l'adaptation des installations
- économie de floculants pour la séparation des boues.

Avantages financiers

- réduction des coûts en personnel à 20 % du nombre de salariés initialement nécessaires, grâce à l'automatisation
- réduction des coûts énergétiques
- réduction des additifs chimiques
- récupération de l'email réutilisable
- réduction des coûts d'élimination des déchets.

Le total des coûts du système de traitement des eaux de process se monte à 2,8 millions d'euros. Grâce aux économies que permet ce système, le délai d'amortissement est de 3 à 4 ans.

Inconvénients éventuels

Bien que le système présenté ici puisse être qualifié de système modèle, les risques qu'il est susceptible de présenter dans des circonstances autres que celles décrites peuvent entraîner les inconvénients économiques et qualitatifs suivants :

- des coûts énergétiques de la technologie de filtration éventuellement supérieurs aux économies réalisées grâce à la récupération des matières premières (selon le taux initial de perte des matières premières)
- une mauvaise conception de la centrale de microfiltration, ayant pour conséquence des coûts d'investissement trop élevés ou une capacité insuffisante
- longueur de la phase d'étude consacrée à l'utilisation de l'email récupéré (corrections de couleurs éventuellement nécessaires)
- mélange des affluents possible uniquement jusqu'à un certain point, sous peine d'annuler les effets d'économie liés à la récupération de matières de haute qualité
- besoin de compétences techniques de haut niveau sur l'ensemble du système
- nécessité de prendre en compte les mesures de redondance lors de la phase de planification

Conclusion : ce type de mise en œuvre d'une technologie environnementale de pointe continue d'être un essai industriel ayant un caractère modèle et faisant l'objet de certaines conditions strictement prédéfinies [30, TWG Ceramics, 2005], [32, TWG Ceramics, 2006].

6.5 Emaillage sans plomb des porcelaines de table haut de gamme

Description et bénéfices environnementaux réalisés

Auparavant, les émaux à base de plomb étaient employés principalement pour fabriquer de la porcelaine de table haut de gamme. Parmi les avantages d'un email en plomb, on peut citer la perfection des surfaces et la simplicité des techniques de traitement, dues notamment au comportement en fusion et en mouillage que manifestent généralement les émaux à base de plomb.

Un fabricant de vaisselle de table a mis au point des formules sans plomb, à base de silicates alcalins de bore et semblables en tout point à des systèmes au plomb en termes de qualité et de propriétés d'application. Il a ainsi réalisé une économie de 60 tonnes sur l'oxyde de plomb. L'utilisation de quantités minimales d'additifs industriels organiques signifie que les impacts environnementaux liés aux émissions organiques lors de la cuisson sont en grande partie évités.

Les émaux sont appliqués par pulvérisation humide, à l'aide de suspensions d'émaillage adaptées sur le plan rhéologique. Les flux d'eaux de process produits dans la cabine de pulvérisation, notamment les éclaboussures et l'eau de nettoyage de la cabine et des étagères, ainsi que les poussières d'email du séparateur à sec sont traités et réutilisés pour l'émaillage en même temps que l'email frais. Grâce à ce cycle d'émaillage fermé, on a pu optimiser l'apport en email (pertes d'email et besoins réels). Les procédés thermiques en aval que sont le séchage et la cuisson ont été adaptés aux nouveaux systèmes d'émaillage et optimisés.

Les motifs simples ne nécessitent pas de cuisson supplémentaire et peuvent cuire en même temps que l'émail, grâce à une technique de décor sous émail. Les motifs complexes et colorés de décor sur et dans l'émail doivent cuire séparément.

Effets inter-milieux

Le traitement et la récupération des eaux usées issues du procédé d'application de l'émail nécessitent des quantités d'énergie plus importantes.

Données opérationnelles et applicabilité

Cette technique est employée pour la porcelaine de table haut de gamme. Son utilisation pour des motifs colorés sous émail n'est pas encore possible ou nécessiterait des investissements supplémentaires.

Economie

Grâce à cette technique, le fabricant réalise actuellement des économies d'oxyde de plomb de 60 tonnes au niveau de deux sites de fabrication. Le passage à cette technique s'est opéré dans le cadre d'une optimisation fondamentale de l'ensemble du procédé. La mise en œuvre de cette technique dans le cadre d'une technologie industrielle modernisée a permis d'augmenter sa viabilité économique et sa compétitivité sur le marché mondial.

Elément moteur de la mise en œuvre

Economie sur les coûts de la matière première et prévention des émissions de plomb.

Installations types et littérature de référence

Villeroy & Boch AG, Allemagne, [30, TWG Ceramics 2005], [32, TWG Ceramics, 2006]

7 REMARQUES FINALES

Calendrier des travaux

L'échange d'informations sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des céramiques a eu lieu entre la fin 2003 et le début 2006, au sein du groupe de travail technique (GTT) international qui avait été créé dans ce but. Il a fallu environ deux ans et demi pour rédiger et mettre au point le présent document sur la base des informations fournies et des commentaires recueillis au cours des deux consultations et de la réunion finale du GTT. Le tableau 7.1 présente les grandes étapes de ces travaux.

Début des travaux sur le BREF relatif aux céramiques	octobre 2003
Réunion de lancement	1 - 2 décembre 2003
Projet 1	octobre 2004
Commentaires sur la version préliminaire 1	janvier 2005
Projet 2	juin 2005
Commentaires sur la version préliminaire 2	septembre 2005
Changement d'auteur du BREF	septembre 2005
Réunion finale du GTT	14 - 17 février 2006
Version finale	septembre 2006

Tableau 7.1 : Calendrier des travaux réalisés sur le BREF relatif à la fabrication des céramiques

Sources d'information et de réalisation du présent document

Le présent document s'appuie sur plus de 30 sources d'information, les informations principales émanant à la fois des industriels et des Etats membres. Certains rapports avaient déjà été élaborés avant la réunion de lancement, afin de fournir des informations ciblées pour la réalisation du présent document, et de nombreuses contributions ont également été apportées après la réunion de lancement. Ces rapports ont été soumis par CERAME UNIE, une association d'industriels représentant la majorité des fabricants européens de céramiques, et les Etats membres que sont l'Autriche, la Belgique, la Finlande, l'Allemagne, l'Italie, les Pays-Bas, le Portugal et l'Espagne peuvent être considérés comme les pierres angulaires du présent document.

D'autres éléments d'information utiles ont été obtenus lors de visites effectuées sur des sites de fabrication de céramiques en Autriche, en Belgique, au Danemark, en Finlande, en France, en Allemagne, en Italie et en Espagne, généralement organisées et accompagnées par des membres du GTT.

Le présent document a été mis au point sur la base d'environ 1000 commentaires sur le premier projet et de plus de 750 commentaires sur le deuxième projet, émis par la quasi-totalité des membres du GTT. A ce propos, on notera qu'en réalité, l'échange d'informations a eu lieu au sein de l'Europe des quinze, les 10 nouveaux Etats membres de l'UE-25, à de rares exceptions près, n'ayant pas participé de manière active.

Sur la base des informations communiquées et des commentaires reçus, le champ d'application et la structure du présent document ont été élaborés afin de couvrir les neuf principaux secteurs de la céramique, à savoir :

- les carreaux pour sols et murs
- les briques et tuiles
- la céramiques ornementales (céramiques domestiques)
- les produits réfractaires
- les appareils sanitaires
- les céramiques techniques
- les tuyaux en grès
- les abrasifs inorganiques.

L'ordre des chapitres du présent document (Résumé, Préface, Champ d'application, chapitres 1 à 9 y compris les MTD, chapitre 5 et les remarques finales, chapitre 7) suit l'ordre standard du document intitulé BREF Outline and Guide (Structure et Guide). Ce guide émane du forum d'échange d'informations (IEF) qui a été établi par la Commission européenne pour faciliter l'échange d'informations dans le cadre de l'IPPC.

Lacunes restant à combler

En dépit du grand nombre d'informations utiles et de commentaires recueillis, il convient de signaler, s'agissant de plusieurs questions, certains problèmes de données et leurs éventuelles répercussions sur le présent document :

- dans une certaine mesure, un manque d'informations quantitatives cohérentes relatives aux données (coûts) économiques réelles de certaines techniques de réduction autres que les techniques d'épuration des effluents gazeux, par rapport aux indicateurs de performance correspondants. Ces lacunes ont donné lieu à certaines observations qualitatives plutôt que quantitatives, notamment au chapitre 4 et par conséquent, à certaines conclusions sur les MTD, lesquelles s'appuient désormais sur une approche essentiellement qualitative
- la multiplicité des groupes de produits et des étapes individuelles des procédés de fabrication ont également suscité des observations qualitatives plutôt que quantitatives, notamment les conclusions sur les MTD à propos de l'efficacité énergétique. Les données qui ont été communiquées dans ce contexte montrent de nombreux aspects ou détails spécifiques, mais elles mènent à conclure que jusqu'à présent, il était difficile de formuler des conclusions quantitatives générales sur ce sujet
- en ce qui concerne l'utilisation de combustibles de substitution (par ex. biogaz/biomasse) ou solides (par ex. charbon, coke de pétrole), seules de rares données sur les émissions et les consommations ont été communiquées, la plupart à un stade avancé de la rédaction du présent document - certaines même au cours de la réunion finale du GTT - et par conséquent, elles n'ont pas pu être intégralement prises en compte.

Degré de consensus atteint lors de la réunion finale du GTT

Les principaux points de discussion lors de la réunion finale du GTT ont été les conclusions relatives aux MTD, lesquelles ont été établies à deux niveaux :

- les conclusions génériques sur les MTD, autrement dit, celles qui s'appliquent à l'industrie céramique dans son ensemble
- les conclusions sur les MTD propres à chaque secteur, autrement dit, celles qui concernent les neuf secteurs céramiques dans le champ.

Les propositions de MTD ont fait l'objet de discussions au cas par cas et à ce propos, il a été décidé après discussion que le chapitre sur les MTD n'avait pas pour objectif de définir ou de proposer des valeurs limites d'émission, mais de suggérer des valeurs de consommation et d'émission associées à l'utilisation d'un certain nombre de MTD et que les « meilleures techniques disponibles » pour telle ou telle installation correspondaient généralement à l'utilisation, individuellement ou en association, des techniques et mesures recensées au chapitre des MTD, dans les sections génériques et sectorielles.

Un autre point de discussion a été la mention explicite, au chapitre des remarques finales, des difficultés liées à l'exploitation des données qui avaient été obtenues très tardivement. Cela concernait en particulier l'utilisation du coke de pétrole comme combustible pour la cuisson au four, ainsi que la recommandation de procéder à une collecte d'informations supplémentaire, afin de faciliter la mise à jour du présent document sur les céramiques.

Un degré élevé de consensus a été atteint au cours de la réunion finale du GTT, aucun point de vue divergent n'a été enregistré et par conséquent, vu en rétrospective sur l'ensemble de la période durant laquelle il a eu lieu, ce processus d'échange d'informations peut être considéré comme une réussite.

Recommandations pour les travaux futurs

L'échange d'informations et son résultat, c'est-à-dire le présent document, représentent une avancée importante dans la réalisation d'une prévention et d'une réduction intégrées des pollutions liées à la fabrication des céramiques. Des travaux supplémentaires permettraient de poursuivre le processus en communiquant des informations émanant de la totalité des Etats membres de l'UE-25, notamment des données sur les coûts réels des techniques de réduction et d'autres données sur l'efficacité énergétique liée aux techniques correspondantes.

Par ailleurs, il sera nécessaire de disposer d'informations supplémentaires sur les combustibles de substitution et les combustibles solides, notamment de toutes sortes de données d'émission et de consommation, par exemple des données sur les émissions réelles mesurées, pour avoir une parfaite connaissance de l'évolution des émissions en vue d'une future révision du présent document.

En outre, il faudra procéder à une révision scrupuleuse des niveaux d'émission associés aux MTD pour la révision du présent document, notamment en ce qui concerne la plage haute des niveaux d'émissions associés aux MTD pour les émissions de SO_x engendrées par la cuisson lors de l'utilisation d'une matière première à haute teneur en soufre, compte tenu de l'évolution des techniques de réduction.

Pour la révision du présent document, un niveau d'oxygène de 17 % doit être considéré comme étant le niveau de référence.

Sujets proposés pour les futurs travaux de R & D

En ce qui concerne plus particulièrement les techniques décrites au chapitre sur les techniques émergentes (chapitre 6), de futurs travaux de R & D resteront nécessaires et utiles, afin que ces techniques puissent être prises en compte dans la détermination des MTD pour la fabrication des céramiques.

Cet aspect mis à part, la Commission européenne est en train de lancer et de soutenir, par le biais de ses programmes RTD, une série de projets traitant des technologies propres, des technologies émergentes de traitement et de recyclage des effluents et des politiques de gestion. Ces projets pourraient contribuer de façon utile aux futures révisions des documents BREF. Les lecteurs sont donc invités à communiquer à l'EIPPCB tout résultat de recherche relevant du domaine d'intérêt du présent document (voir également la préface du présent document).

8 REFERENCES

- 1 BMLFUW (2003). "Austrian Study on State of the Art of Manufacturing Ceramic Goods by Firing".
- 2 VITO (2003). "The Flemish BAT-report on the ceramic industry (brick and roof tile industry), English translation of parts of the original Dutch version - published in 1999".
- 3 CERAME-UNIE (2003). "Proposed Best Available Techniques (BAT) Reference Document (BREF) for the European Ceramic Industry, Rev. Nov. 2003".
- 4 UBA (2001). "Exemplary Investigation into the State of Practical Realisation of Integrated Environmental Protection within the Ceramics Industry under Observance of the IPPC-Directive and the Development of BAT Reference Documents".
- 5 InfoMil (2003). "Dutch Fact Sheets for the Production of Ceramics".
- 6 Timellini, G., Canetti, A. (2004). "The Italian Ceramic Tile Industry. Contribution to the identification and specification of the Best Available Techniques".
- 7 Dodd, A., Murfin, D. (1994). "Dictionary of Ceramics", The Institute of Materials.
- 8 Ullmann's (2001). "Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition", Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
- 10 Navarro, J. E. (1998). "Integrated Pollution Prevention and Control in the Ceramic Tile Industry. Best Available Techniques (BAT)".
- 11 Shreve, R. N. (1945). "The Chemical Process Industries, The Ceramic Industries", McGraw-Hill Chemical Engineering Series.
- 12 CTCV (2004). "Portuguese Ceramic Industry Data".
- 13 SYKE (2004). "The contribution of Finland to the exchange of information in the EU on the use of BAT to control the environmental impact of the manufacture of ceramic products, DRAFT June 28, 2004".
- 14 UBA (2004). "Production of inorganic bonded abrasives".
- 17 Burkart, M. (2004). "Personal Communication by site visits".
- 20 CERAME-UNIE (2004). "Proposed Best Available Techniques (BAT) Reference Document (BREF) for the European Ceramic Industry, Rev. Jan. 2004".
- 21 Almeida, M., Vaz, S., Baio, D. (2004). "Impactes Ambientais e Comércio de Emissões Indústria Cerâmica - Um caso de estado".
- 22 SYKE (2004). "Report on Best Available Techniques in the Finnish ceramic industry".
- 23 TWG Ceramics (2005). "Merged and sorted comments master spread sheet on draft 1".
- 24 VKI-Germany (2004). "Breviary Technical Ceramics".

- 25 Volland, T., Leuenberger, C., Roque, R. (2004). "Statistic correlations between two methods of pollutant emission evaluation", L'INDUSTRIE CÉRAMIQUE & VERRIÈRE, No 994 - Mai-Juin 2004, pp. 54 - 66.
- 26 UBA (2005). "Basic information and data on the expanded clay industry in Germany", Compilation by German National Working group and German expanded clay industry.
- 27 VDI (2004). "Emission control ceramic industry, VDI Guideline 2585, Draft July 2004".
- 28 Schorcht, F. (2005). "Personal Communication by site visits".
- 29 IMA-Europe (2005). "IMA-Europe's comments on the inclusion of calcined clays, 4. May 2005".
- 30 TWG Ceramics (2005). "Merged and sorted comments master spread sheet on draft 2".
- 31 Probst, R. (2005). "Development of processes for cleaning ceramic waste water", cfi ceramic forum international Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft.
- 32 TWG Ceramics (2006). "Final TWG meeting Ceramics".

9 GLOSSAIRE

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
% en vol.	pourcentage en volume.
% en poids	pourcentage en poids.
absorption	processus volumétrique par lequel une substance en imprègne une autre (effet d'éponge)
acide	donneur de protons. Substance qui libère plus ou moins rapidement des ions hydrogène dans une solution aqueuse.
acidification	ajout d'un acide à une substance pour obtenir des propriétés acides.
adsorption	processus surfacique ; accumulation de molécules gazeuses ou liquides formant une mince pellicule à la surface d'un solide (assimilation de surface)
aération	action qui consiste à mélanger un liquide avec de l'air (oxygène).
aérobie	qualifie un processus biologique qui se déroule en présence d'oxygène.
anaérobie	qualifie un processus biologique qui se déroule en l'absence d'oxygène.
AOCI	composés organo-chlorés adsorbables.
AOX	composés organo-halogénés adsorbables. Concentration totale en milligrammes par litre, exprimée en chlore, de tous les composés halogénés (à l'exception du fluor) présents dans un échantillon d'eau et susceptibles d'être adsorbés sur charbon actif.
argile	matière naturelle caractérisée par sa plasticité, au moment de son extraction de l'argillère ou après avoir été broyée et mélangée avec de l'eau.
atm	atmosphère normale ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ N/m}^2$).
bar	bar ($1,013 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$).
barbotine	suspension d'une argile et/ou d'un autre matériau céramique dans l'eau.
base	accepteur de protons. Substance qui absorbe plus ou moins rapidement des ions hydrogène dans une solution aqueuse.
BF	floculation discontinue de type batch.
BFW	eau d'alimentation de chaudière, destinée à produire de la vapeur.
biodégradable	qui se décompose physiquement et/ou chimiquement sous l'action de microorganismes. Par exemple, de nombreux produits chimiques, les résidus d'aliments, le coton, la laine et le papier sont biodégradables.
biodiversité	le nombre et la variété de différents organismes au sein des complexes écologiques dans lesquels ils existent à l'état naturel. Les organismes sont organisés à plusieurs niveaux, qui vont de l'écosystème complet jusqu'aux structures biochimiques qui constituent la base moléculaire de l'hérédité. Ainsi, ce terme regroupe les différents écosystèmes, espèces et gènes dont la présence est obligatoire pour assurer un environnement sain. La chaîne alimentaire doit être caractérisée par un grand nombre d'espèces, représentant de multiples relations de prédateur à proie.
biscuit	(1) une poterie qui est cuite mais non encore émaillée. (2) ce terme, qui signifie « non émaillé », s'emploie dans des locutions telles que la « cuisson de biscuit ».

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
boues	suspension ayant une teneur en matières sèches relativement élevée.
BREF	Document de référence sur les meilleures techniques disponibles.
brique de parement	type de brique de construction qui peut être soit de qualité industrielle, soit de qualité de parement, et qui présente un faible taux d'absorption d'eau et une résistance élevée à l'écrasement.
BTEX	benzène, toluène, éthylbenzène, xylène.
BTX	benzène, toluène, xylène.
calcaire	roche minérale constituée principalement de CaCO_3 ; utilisée telle quelle ou comme matière première pour produire, par décarbonatation, de la chaux vive (oxyde de calcium) et, par hydratation de la chaux vive, de la chaux éteinte (hydroxyde de calcium).
calcite	forme cristalline du carbonate de calcium.
capacité de four	volume de cuisson du four.
cassette	matériel d'enfournement de forme spéciale, servant par exemple de support aux tuiles pendant leur cuisson.
CE 50	Concentration d'effet 50. Concentration à laquelle des effets sont observés chez 50 % de la population d'essai, après administration d'une seule dose. Les effets comprennent l'immobilisation de la daphnie, l'inhibition de la croissance, de la division cellulaire ou de la production de biomasse, ou la production de chlorophylle par des algues.
CEN	Comité européen de normalisation.
céramique	le terme « céramique » (produit céramique) s'emploie en général pour désigner un matériau inorganique (contenant éventuellement une certaine quantité de matière organique) constitué de composés non métalliques et durci par un procédé de cuisson.
CL 50	Concentration létale 50. La plus faible concentration d'une substance dans l'eau ou dans l'air ambiant, en milligrammes par litre, suffisant à entraîner la mort dans 50 % de la population d'essai, au cours d'une période définie (par ex. 96 heures pour des poissons, 48 heures pour des daphnies).
COT	Carbone organique total.
COV	composés organiques volatils.
craie	carbonate de calcium de type amorphe.
cuisson	procédé qui consiste à soumettre des produits en céramique à un traitement thermique dans un four, afin de créer une liaison vitreuse ou cristalline qui confère à ces produits les propriétés associées à une matière céramique
DBO	demande biochimique en oxygène : la quantité d'oxygène dissous nécessaire aux micro-organismes pour décomposer la matière organique. L'unité de mesure de la DBO est le milligramme d'oxygène par litre ($\text{mg O}_2/\text{l}$). En Europe, la DBO se mesure généralement au bout de 3 jours (DBO_3), 5 jours (DBO_5) ou 7 jours (DBO_7).
DCO	demande chimique en oxygène : quantité de dichromate de potassium, exprimée en oxygène, nécessaire pour oxyder chimiquement à environ 150 °C les substances contenues dans les eaux usées.
densité d'enfournement	masse des produits à cuire sans auxiliaires de cuisson dans le volume

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
	de cuisson du four par rapport au volume total de cuisson du four.
dH	mesure de la dureté de l'eau.
DL 50	Dose létale 50. La plus faible dose d'une substance administrée à des espèces telles que des souris et des rats qui suffit à entraîner la mort dans 50 % de la population d'essai, au cours d'une période définie (pas plus de 14 jours), exprimée en milligrammes de substance d'essai par kilogramme de poids corporel.
DN	largeur nominale.
dolomite	type de calcaire dont la fraction carbonatée est dominée par un minéral appelé dolomite, ou carbonate de calcium magnésium, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$.
EF	électrofiltre.
effet aigu	effet nocif sur un organisme vivant, dans lequel des symptômes graves apparaissent rapidement et s'atténuent souvent une fois l'exposition terminée.
effets inter-milieux	calcul des effets impacts sur l'environnementaux des émissions dans l'eau/l'air/le sol, de la consommation d'énergie, de la consommation de matières premières, du bruit et du captage des eaux (soit la totalité des exigences de la directive IPPC).
effets multimilieux	voir effets inter-milieux.
effluent	fluide physique (de l'air ou de l'eau accompagnés de contaminants) qui forme une émission.
effluents gazeux	terme générique qui désigne les gaz ou l'air rejetés lors des procédés de combustion ou des procédés d'extraction à des températures ambiantes.
EIPPCB	Bureau européen pour la prévention et la réduction intégrées de la pollution.
émail	mince couche vitreuse formée à la surface d'un produit céramique par application d'un revêtement par cuisson.
émission	rejet direct ou indirect de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans l'air, l'eau ou le sol.
émission fugitive	émission provoquée par un matériel non étanche ou une fuite : émission dans l'environnement qui résulte d'une perte progressive d'étanchéité d'un matériel destiné à contenir un fluide captif (gazeux ou liquide) et essentiellement provoquée par une différence de pression et par la fuite qu'elle engendre. Exemples d'émissions fugitives : fuite d'une bride, d'une pompe, d'un matériel étanché ou serré, etc.
émission spécifique	émission liées à une base de référence, telle que la capacité de production ou la production réelle (par ex. masse par tonne ou par unité produite).
émissions diffuses	émissions résultant d'un contact direct entre des substances volatiles ou des poussières légères et l'environnement (l'atmosphère, dans des conditions normales d'exploitation). Ces émissions peuvent résulter : <ul style="list-style-type: none"> - de la conception intrinsèque du matériel (par ex. filtres, séchoirs etc.) - des conditions d'exploitation (par ex. lors d'un transfert de matières entre différents récipients) - du type d'exploitation (par ex. activités de maintenance) - ou d'un rejet progressif vers d'autres milieux (par ex. dans l'eau de refroidissement ou dans les eaux usées).

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
	Les émissions fugitives sont un sous-ensemble des émissions diffuses.
engobe	couche de barbotine blanche ou colorée qu'on applique sur une pâte céramique poreuse pour améliorer son aspect.
état normal	désigne une température de 273 K et une pression de 1013 hPa.
eutrophisation	pollution d'une masse d'eau par des eaux d'égout, des engrais infiltrés dans les sols et des déchets industriels (nitrates et phosphates inorganiques). Ces composés ont pour effet de stimuler la croissance des algues, de réduire la teneur en oxygène de l'eau, tuant ainsi les espèces animales qui ont de forts besoins en oxygène.
exploitant	personne physique ou morale qui exploite ou contrôle l'installation ou, si la législation du pays le prévoit, à laquelle a été délégué un pouvoir économique décisif sur le fonctionnement technique de l'installation.
fioul EL	fioul extra-léger
fondant	substance qui, même en faible quantité, abaisse le point de fusion d'une matière dans laquelle elle se trouve à l'état naturel (par ex. bases contenues dans l'argile) ou d'une matière à laquelle elle a été ajoutée (par ex. borax ajouté à des émaux).
four	installation à haute température utilisée pour la cuisson des céramiques.
frittage	terme générique qui désigne la densification d'un compact de poudre sous l'action de la chaleur pour produire un corps polycristallin.
fritte	composition céramique fondue et trempée pour former un verre et se présentant généralement sous forme granulée.
gaz de combustion	effluents gazeux rejetés par les procédés de cuisson/combustion.
GJ	gigajoule.
GNL	gaz naturel liquéfié
GPL	gaz de pétrole liquéfié
GTT	groupe de travail technique.
HFO	fioul lourd.
hPa	hectopascal.
IEF	Forum d'échange d'informations (organe consultatif informel dans le cadre de la directive IPPC).
immission	apparition et niveau d'une substance polluante, d'une odeur ou d'un bruit dans l'environnement.
installation	unité technique fixe dans laquelle interviennent une ou plusieurs des activités figurant à l'annexe I de la directive IPPC ainsi que toute autre activité s'y rapportant directement qui est liée techniquement aux activités exercées sur le site et qui est susceptible d'avoir des incidences sur les émissions et la pollution.
installation existante	installation en service ou, dans le cadre de la législation existante avant la date de mise en application de la présente directive, installation autorisée ou ayant fait l'objet de l'avis de l'autorité compétente d'une demande complète d'autorisation, à condition que cette installation soit mise en service au plus tard un an après la date de mise application de la présente directive.
IPPC	prévention et réduction intégrées de la pollution.

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
I-TEQ	équivalence de toxicité dioxine/furane.
K	degré Kelvin (0 °C = 273,15 K).
kaolin	nom dérivé du chinois Kao-Lin, nom d'une crête élevée où cette argile blanche de cuisson a été découverte (appelé également « argile de Chine »).
kcal	kilocalorie (1 kcal = 4,19 kJ).
kWh	kilowatt-heure (1 kWh = 3600 kJ = 3,6 MJ).
LAS ou SAL	sulfonate d'alkylbenzène linéaire.
LOEC	« Lowest Observed Effect Concentration » : la plus faible concentration ayant un effet observé. La plus faible concentration d'une substance d'essai, déterminée de façon expérimentale, à laquelle des effets nocifs peuvent être observés.
LWA	« Lightweight Expanded Clay Aggregate » : granulat léger d'argile expansée. Il s'agit d'un granulat d'argile gonflée produit par le chauffage brutal d'argiles spéciales soit dans un four rotatif, soit sur un foyer de frittage
m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, les débits volumétriques correspondent à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
magnésie	oxyde de magnésium (MgO).
magnésite	carbonate de magnésium (MgCO ₃).
matériel d'enfournement	terme générique désignant des pièces réfractaires qui servent de support aux produits céramiques pendant leur cuisson au four (« auxiliaires de cuisson »).
MES	matières en suspension (teneur) (dans l'eau) (voir aussi MEST).
MEST	matières en suspension totales (teneur) (dans l'eau) (voir aussi MES).
mesure/technique primaire	technique qui modifie d'une certaine manière la façon dont se déroule le procédé principal, permettant ainsi de réduire les émissions ou les consommations (voir technique curative).
mesure/technique secondaire	voir technique curative.
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des gaz de combustion à 18 % en volume d'oxygène et à l'état normal et les concentrations en benzène correspondent à 15 % en volume d'oxygène et à l'état normal.
MJ	mégajoule (1 MJ = 1000 kJ = 10 ⁶ J).
MPa	mégapascal.
MS	matières sèches (teneur). Masse de matière qui reste après séchage par la méthode d'essai normalisée.
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
n.a.	non disponible.
n.d.	non déterminé.
naphtènes	hydrocarbures dont les molécules contiennent un ou plusieurs cycles saturés ayant 5 ou 6 atomes de carbone et auxquels sont rattachées des ramifications de type paraffinique (adjectif : naphténique).

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
N-Kj	azote analysé par la méthode Kjeldahl.
Nm ³	mètre cube normal (273 K, 1013 hPa).
NOAC	« No Observed Acute Effect Concentration » : concentration sans effet aigu observé.
NOEC	« No Observed Effect Concentration » : concentration sans effet observé.
particules	poussières.
pâte	(1) mélange de matières premières en attente d'être façonné pour former un produit céramique. (2) partie intérieure d'une poterie, par opposition à l'émail.
pH	symbole de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution. Il s'agit d'un nombre équivalent au logarithme en base 10 de la réciproque de la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse.
PIB	produit intérieur brut.
PME	petite(s) et moyenne(s) entreprise(s).
polluant	substance individuelle ou groupe de substances susceptible de nuire ou de porter atteinte à l'environnement.
poterie	ce terme est généralement synonyme de céramiques domestiques.
ppm	parties par million.
produit cru	produit céramique, façonné mais ni séché, ni cuit.
produits biochimiques	produits chimiques qui existent à l'état naturel ou qui sont identiques à des substances naturelles. Exemples : les hormones, les phéromones et les enzymes. Les produits biochimiques fonctionnent comme les pesticides, par des modes d'action non toxiques et non mortels, par exemple pour perturber le mode d'accouplement des insectes, pour réguler la croissance ou pour servir de répulsif.
PTFE	polytétrafluoroéthylène (Teflon).
s.o.	sans objet.
sorption	processus par lequel une substance en fixe ou en retient une autre par absorption ou par adsorption.
sources diffuses	sources d'émissions similaires diffuses ou directes qui sont multiples et réparties à l'intérieur d'une zone définie.
surveillance	processus destiné à évaluer ou à déterminer la valeur réelle et les variations d'une émission ou d'un autre paramètre, en se basant sur des opérations systématiques, périodiques ou ponctuelles de suivi, de contrôle, de prélèvement et de mesure, ou autre méthode d'évaluation destinée à fournir des informations sur les quantités émises ou sur les tendances relatives aux émissions de polluants.
technique curative	technique qui permet de réduire les émissions ou les consommations finales grâce à un procédé supplémentaire mais sans modifier fondamentalement le déroulement du procédé principal. Synonymes : technique secondaire, technique de réduction. Antonymes : technique intégrée au procédé, technique primaire (technique qui modifie d'une certaine manière la façon dont se déroule le procédé principal, permettant ainsi de réduire les émissions ou les consommations brutes).

TERME FRANÇAIS	SIGNIFICATION
TJ	térajoule.
toxicité aigue	effets nocifs qui résultent d'une seule dose ou d'une seule exposition à un produit chimique ; tout effet toxique produit lors d'une période courte, généralement inférieure à 96 heures. Ce terme s'emploie généralement pour décrire des effets obtenus sur des animaux de laboratoire.
tr/min	tours par minute.
valeurs limites d'émission	masse, exprimée en fonction de certains paramètres spécifiques, concentration et/ou niveau d'une émission, à ne pas dépasser au cours d'une ou de plusieurs périodes données.
verre	solide ne présentant pas d'ordre à longue distance dans l'agencement de ses atomes.
vitreux	terme appliqué à une céramique qui présente, par suite d'une vitrification à haut degré (par opposition au frittage), une porosité extrêmement faible.
vitrification	fusion partielle progressive d'une argile ou d'une pâte, résultant d'un processus de cuisson.
W/(mK)	conductivité thermique.
µg	microgramme.
µS	microsiemens.

SYMBOLES CHIMIQUES

Al...Aluminium	H ₂ O...Eau	PbO...Oxyde de plomb
Al ₂ O ₃ ...Oxyde d'aluminium	HCl...Chlorure d'hydrogène	Pr...Praséodyme
BaO...Oxyde de baryum	HCN...Acide cyanhydrique	Pt...Platine
BN...Nitrure de bore	HF...Fluorure d'hydrogène	Rh...Rhodium
Ca...Calcium	K ₂ O...Oxyde de potassium	S...Soufre
Ca(OH) ₂ ...Hydroxyde de calcium	MgCO ₃ ...Carbonate de magnésium	Sb...Antimoine
CaCl ₂ ...Chlorure de calcium	MgO...Oxyde de magnésium	Si...Silicium
CaCO ₃ ...Carbonate de calcium	Mn...Manganèse	SiC...Carbure de silicium
CaF ₂ ...Fluorure de calcium	Mo...Molybdène	SiO ₂ ...Dioxyde de silicium
CaO...Oxyde de calcium	Na ₂ CO ₃ ...Carbonate de sodium	Sn...Etain
CaSO ₃ ...Sulfite de calcium	Na ₂ O...Oxyde de sodium	SO ₂ ...Dioxyde de soufre
CaSO ₄ ...Sulfate de calcium	Na ₂ SO ₃ ...Sulfite de sodium	SO ₃ ...Trioxyde de soufre
Cd...Cadmium	NaCl...Chlorure de sodium	SO _x ...Oxydes de soufre
Ce...Cérium	NaF...Fluorure de sodium	Ti...Titane
Co...Cobalt	NaHCO ₃ ...Carbonate acide de sodium	TiN...Nitrure de titane
CO...Monoxyde de carbone	NaHO...Hydroxyde de sodium	TiO ₂ ...Dioxyde de titane
CO ₂ ...Dioxyde de carbone	NH ₃ ...Ammoniac	V...Vanadium
Cr...Chrome	Ni...Nickel	W...Tungstène
Cu...Cuivre	NO ₂ ...Dioxyde d'azote	WB ₂ ...Borure de tungstène
F...Fluor	NO _x ...Oxydes d'azote	Zn...Zinc
Fe...Fer	O ₂ ...Oxygène	Zr...Zirconium
Fe ₂ O ₃ ...Oxyde de fer	Pb...Plomb	ZrO ₂ ...Dioxyde de zirconium