



COMMISSION EUROPEENNE

Direction Générale JRC

JOINT RESEARCH CENTRE ,Centre de Recherches Intégrées,

Institut d'Etudes Technologiques Prospectives ,Séville,

**Technologies pour le Développement Durable**

**Bureau Européen IPPC**

# PROJET DE TRADUCTION

Seule la version adoptée par la  
Commission en anglais fait foi

**Prévention et Contrôle Intégrés des Pollutions (PCIP)**

**Document de référence sur  
les meilleures techniques disponibles dans l'industrie du verre**

**décembre 2001**

## RESUME

### 1. Introduction

Le présent document de référence, sur les meilleures techniques disponibles, dans l'industrie du verre, est né d'un échange d'informations, réalisé selon les principes énoncés par l'Article 16 ( 2) de la Directive du Conseil 96/61/CE. Le présent document doit être examiné par rapport à l'introduction qui décrit l'objectif du document et son utilisation.

Le présent document concerne les activités mentionnées aux paragraphes 3.3 et 3.4 de l'Annexe 1 de la Directive 96/61/EC, et notamment :

- 3.3 Les installations destinées à la fabrication du verre, y compris les fibres de verre, dotées d'une capacité de fusion supérieure à 20 tonnes /jour
- 3.4 Les installations pour la fusion de substances minérales, y compris la production de fibres minérales, dotées d'une capacité de fusion supérieure à 20 tonnes /jour.

Aux fins du présent document, les activités industrielles concernées par les définitions contenues dans la Directive sont regroupées sous la définition « d'industrie du verre », comprenant huit secteurs différents. Cette répartition en secteurs a été effectuée en fonction des produits fabriqués. Bien qu'il existe d'inévitables recoupements entre lesdits secteurs : le verre d'emballage, le verre plat, les fibres de verre à fil continu, le verre pour gobeletterie, les verres spéciaux, y compris le silicate de sodium, la laine minérale, avec deux sous-secteurs, celui de la laine de verre et de la laine de roche, les fibres céramiques et les frites de verre.

Ce document comprend sept chapitres et un certain nombre d'annexes contenant des informations complémentaires. Les 7 titres des chapitres et les 4 annexes sont :

- 1. Données générales
- 2. Procédés et techniques appliqués
- 3. Niveaux actuels de consommation et d'émission
- 4. Techniques à prendre en considération dans la définition des MTD, meilleures techniques disponibles
- 5. Conclusions relatives aux MTD
- 6. Techniques émergentes
- 7. Conclusions et recommandations
- 8. Annexe 1 Données relatives aux émissions des installations fournies à titre d'exemple
- 9. Annexe 2 Taux de soufre fournis à titre d'exemple
- 10. Annexe 3 Contrôle
- 11. Annexe 4 Législation des Etats Membres

Ce récapitulatif a pour but de synthétiser les principaux éléments, définis par le document. Etant donné la nature du document principal, il est impossible de présenter de manière complète toute sa complexité et ses subtilités, dans cette introduction. Par conséquent, nous avons fait référence au texte principal et il convient de souligner que seul le texte principal, dans son intégralité, devra être utilisé en tant que référence, pour la définition des MTD relatives à une installation spécifique. En effet, en utilisant uniquement ce récapitulatif comme base pour la définition des critères de référence et en extrapolant les données de leur contexte original on risque de ne pas interpréter correctement cette question extrêmement complexe.

### 2. L'industrie du verre

Le chapitre 1 contient les données de base relatives à l'industrie du verre. Ce chapitre a comme but principal de fournir une compréhension générale de ce secteur, dans son ensemble. Afin de permettre aux décideurs de situer les informations qui figurent plus loin dans le document, dans le contexte des principales tendances qui affectent l'industrie du verre.

L'industrie du verre, à l'intérieur de l'Union Européenne, présente des situations extrêmement variées, à la fois pour le type de produits que les techniques de production utilisées. La gamme de produits comprend des objets aussi différents que des verres en cristal au plomb, faits main et décorés avec des motifs compliqués, ou de gros volumes de verre float, produits en série, pour les besoins de l'industrie automobile ou du bâtiment. Les techniques de fabrication peuvent comprendre, à la fois, les petits fours électriques, utilisés dans la production de fibres céramiques et les fours à récupération, de grosses dimensions, employés dans le domaine du verre plat et capables d'assurer une production supérieure à 700 tonnes par jour. Le secteur du verre, au sens le plus large, comprend également toute une série d'installations de plus petites dimensions, avec une production inférieure à 20 tonnes/jour qui figurent à l'Annex 1 de la Directive.

L'industrie du verre est essentiellement une industrie de produits de base. Bien que de nombreuses façons d'ajouter de la valeur aux produits à gros volume aient été développées, afin de maintenir la compétitivité du secteur. Plus de 80 % de la production du secteur est destinée à être vendue à d'autres secteurs de production, et l'industrie du verre dans son ensemble dépend en grande partie de l'industrie du bâtiment et du secteur agroalimentaire. Toutefois, certains secteurs de l'industrie du verre, avec des volumes de production moins importants, se consacrent à la fabrication de produits techniques ou destinés à la consommation, à haute valeur ajoutée.

La production totale de l'industrie du verre dans l'Union Européenne, en 1996, a été évaluée à 29 millions de tonnes, à l'exclusion des fibres de céramique et des frites de verre. Le tableau ci-dessous fournit une répartition indicative par secteur.

Secteur	% de la production totale de l'UE (1996)
verre d'emballage	60
verre plat	22
fibres de verre à fil continu	1,8
verre pour gobeletterie	3,6
verres spéciaux	5,8
laine minérale	6,8

#### **Répartition approximative par secteur de la production de l'industrie du verre à l'exclusion du secteur des fibres céramiques et des frites de verre**

Le chapitre 1 contient des données relatives à chaque secteur sous les titres suivants : Généralités du secteur, produits et marchés, aspects commerciaux et financiers et principales questions environnementales. Etant donné la diversité de l'industrie du verre, les données fournies varient beaucoup en fonction du secteur analysé. A titre d'exemple, vous trouverez une synthèse des informations fournies, pour le secteur du verre d'emballage, dans le paragraphe ci-dessous. Des données analogues sont fournies pour tous les autres secteurs, si elles sont disponibles

La production de verre d'emballage, qui représente environ 60% de la production totale de verre, constitue le secteur le plus important, au sein de l'industrie du verre européenne. Ce secteur concerne principalement la fabrication d'emballages en verre, tels que les bouteilles ou les bocaux, mais aussi celle de vaisselle industrielle. En 1997, ce secteur a produit plus de 17,3 millions de tonnes d'objets en verre, dans les 295 installations, situées sur tout le territoire de l'UE. Cela représente environ 70 entreprises, avec 140 sites de production. Le verre d'emballage est fabriqué dans tous les Etats Membres, à l'exception du Luxembourg. Le secteur des emballages pour boissons représente environ 75 %, du total des emballages en verre. Les principaux concurrents de ces produits sont les emballages à base d'acier, d'aluminium, de composés du carton et de matières plastiques. L'utilisation accrue de verre recyclé constitue une évolution importante du secteur. Le taux moyen d'utilisation de calcin provenant de la consommation, dans le secteur européen de la fabrication de verre d'emballage, représente environ 50 %, de l'apport total de matières premières, certaines usines utilisant jusqu'à 90 % de verre recyclé.

### 3. Procédés appliqués

Le chapitre 2 décrit les procédés et les techniques de fabrication, généralement utilisés dans l'industrie du verre. La plupart des procédés rentrent dans les cinq étapes de fabrication suivantes : traitement des matières premières, fusion, formage, traitement en aval et emballage.

La diversité de l'industrie du verre utilise un large éventail de matières premières. Les techniques utilisées pour le traitement des matières premières sont communes à de nombreux secteurs et sont décrites au chapitre 2.1 du rapport. Le principal problème c'est le contrôle de la poussière, émanant du traitement de matières fines. Les principales matières premières, employées dans la fusion, sont des matières pour le formage du verre, par exemple du sable siliceux ou du calcin, des matériaux intermédiaires/modificateurs, par exemple du carbonate de sodium, du calcaire ou du feldspath, et des agents colorants/décolorants, chromate de fer, oxyde de fer.

L'étape essentielle dans la fusion du verre est la fusion des différentes matières premières, à haute température, pour créer du verre liquide. Le procédé de fusion consiste en un ensemble complexe de réactions chimiques et de procédés physiques. La fusion se divise en différentes phases, le réchauffement, la fusion principale, l'affinage et l'homogénéisation et l'emballage.

Vous trouverez ci-dessous une description des différentes techniques de fusion. D'autres techniques sont utilisées, dans les secteurs de la production des laines de roche et des frites, qui seront décrites de manière détaillée, dans le document principal. La fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie. Par conséquent, le choix de la source d'énergie, de la technique de réchauffement et de la méthode de récupération de la chaleur, sont autant d'éléments essentiels pour la conception du four. Ces mêmes éléments revêtent une importance cruciale pour l'environnement et la consommation d'énergie des installations de fusion. Les trois principales sources d'énergie, pour la fabrication du verre, sont le gaz, le fuel et l'électricité.

**Les fours régénératifs** utilisent des systèmes de récupération de la chaleur par régénération. Les brûleurs sont généralement situés à l'intérieur ou sous les orifices d'arrivée de l'air et des émissions gazeuses. Le gaz, présent dans les émissions gazeuses, est utilisé pour préchauffer l'air avant la combustion, en faisant passer les émissions gazeuses dans une chambre contenant des matériaux réfractaires, qui absorbent la chaleur. Le four s'allume sur un seul côté à la fois. Après vingt minutes environ, l'allumage est inversé et l'air de combustion passe à travers la chambre préalablement chauffée, par les émissions gazeuses. On peut atteindre des températures jusqu'à 1 400 °C qui offrent un rendement thermique très élevé. Dans les fours régénératifs, à brûleurs transversaux, les orifices de combustion et les brûleurs sont placés sur les côtés du four, tandis que les chambres de régénération sont placées sur l'un des côtés du four. Dans les fours à boucle, les principes de fonctionnement sont les mêmes. Mais les deux chambres de régénération sont placées à l'une des extrémités du four.

**Les fours à récupération** utilisent des échangeurs thermiques, récupérateurs thermiques, pour la récupération de la chaleur, avec préchauffage continu de l'air de combustion, par l'intermédiaire des émissions gazeuses. Les températures de préchauffage de l'air atteignent, au maximum 800 °C environ, pour les récupérateurs métalliques. La capacité de fusion spécifique, par zone de fondoir à verre, des fours à récupération est de 30 % environ inférieure à celle d'un four régénératif. Les brûleurs sont placés sur chaque côté du four, de façon transversale, par rapport au flux du verre, et sont allumés en permanence des deux côtés. Ce type de four est principalement utilisé dans tous les cas où un fonctionnement extrêmement flexible, avec un investissement initial minimum, est nécessaire, notamment lorsque le volume de production n'est pas suffisant pour que l'utilisation de régénérateurs soit viable financièrement. Il est plus adapté aux installations dotées d'une capacité réduite. Bien qu'on l'utilise également, parfois, pour des fours à capacité plus élevée, jusqu'à 400 tonnes par jour.

**L'alimentation oxycombustion** implique le remplacement de l'air de combustion par de l'oxygène, pureté >90 %. L'élimination de la majorité de l'azote de l'atmosphère de combustion

réduit le volume des émissions gazeuses d'environ deux tiers. Par conséquent, on peut réaliser des économies d'énergie dans l'exploitation du four. Car il n'est pas nécessaire de réchauffer l'azote, contenu dans l'atmosphère, pour l'amener à la température des flammes. De plus, la formation de NOx thermique est nettement inférieure. En général, la structure des fours oxycombustion est très similaire à celle des fondoirs à verre, avec des brûleurs latéraux multiples et un seul orifice d'échappement des gaz. Toutefois, les fours conçus pour la combustion de l'oxygène n'utilisent pas de systèmes de récupération de la chaleur pour préchauffer l'oxygène fourni aux brûleurs.

**Les fours électriques** sont constitués d'une caisse, intérieurement revêtue de matériau réfractaire, soutenu par un châssis en acier, avec des électrodes introduites par le côté, par le haut, ou plus généralement, par le fond du four. L'énergie de fusion est fournie par résistance chauffante, lorsque le courant passe à travers le verre liquide. Cette technique est généralement appliquée dans des fours de petites dimensions, notamment pour la fabrication de verres spéciaux. La viabilité financière des fours électriques a une limite à ne pas dépasser qui dépend du coût de l'électricité, par rapport à celui des combustibles fossiles. Le remplacement des carburants fossiles, à l'intérieur du four, élimine la formation de résidus de la combustion.

**L'association de combustibles fossiles et de la fusion électrique** peut se faire de deux formes différentes, par une cuisson utilisant principalement un combustible d'origine fossile, avec un boosting électrique, ou par une cuisson essentiellement électrique, avec un complément de carburant fossile. Le boosting électrique est une méthode destinée à ajouter de la chaleur dans un four, pour la cuisson du verre, en faisant passer du courant électrique à travers des électrodes placées sur le fond de la cuve. Une technique moins usitée est celle qui consiste à utiliser du gaz ou du pétrole en tant que combustible complémentaire, dans des fours à alimentation principalement électrique.

**La fusion discontinue** est utilisée pour produire de plus petites quantités de verre. En particulier lorsque la formule du verre change souvent. Dans ces cas, les fours à pots et les fours journaliers sont utilisés pour fondre certaines quantités de matière première. Un grand nombre de procédés de ce type ne devraient pas rentrer dans le domaine d'application de la PCIP. Car normalement, la production ne dépasse pas une capacité de fusion de 20 tonnes par jour. Le four à pots est composé essentiellement d'une partie inférieure, servant à réchauffer l'air de combustion, et d'une partie supérieure, servant de chambre de fusion, dans laquelle sont placés les pots. Les fours journaliers ont été conçus à partir des fours à pots, pour obtenir des capacités plus importantes, de l'ordre de 10 par jour. En ce qui concerne leur structure, ils ressemblent davantage au quadrilatère d'un four traditionnel. Mais ils sont alimentés quotidiennement en matières premières.

**Des fours spéciaux** ont été conçus pour améliorer la rentabilité et les performances en matière de protection environnementale. Les types de fours les plus connus, dans cette catégorie, sont le Lo NOx et le Flex.

Les principaux procédés et techniques utilisés, pour la production du verre, sont illustrés, pour chacun des secteurs, dans les paragraphes suivants.

**Les verres d'emballage** constituent un secteur très disparate, dans lequel on retrouve presque toutes les techniques décrites plus haut. Le procédé de formage a lieu en deux phases, le formage initial de l'ébauche, qu'on obtient soit par pression à l'aide d'un piston plongeur, par soufflage à l'air comprimé, et le moulage définitif par soufflage, grâce auquel on obtient le moule définitif. Ces deux procédés sont appelés, respectivement, "pressé-soufflé" et "soufflé - soufflé". La production de verre d'emballage s'effectue, principalement, avec des machines SI ,à Section Individuelle.

**Le verre plat** est produit essentiellement dans des fours à brûleurs transversaux. Le principe de base du bain de float consiste à verser le verre fondu, sur un bain d'étain fondu, en formant un ruban, dans lequel la surface supérieure et la surface inférieure deviennent parallèles, grâce à la

gravité et à la tension superficielle. A la sortie du bain de float, le ruban de verre passe dans une gaine de recuit, qui refroidit progressivement le verre, pour réduire les tensions résiduelles. Des gaines en continu peuvent être utilisées, pour améliorer les performances du produit, par exemple un vernissage à basse résistance.

**Les fibres de verre à fil continu** sont fabriquées dans des fours à récupération ou dans des fours oxycombustion. Le verre coule du four à l'avant-creuset, où il passe à travers des coussinets, placés dans la base. Le verre passe ensuite, à travers les plaquettes des coussinets, pour former des fils continus. Ensuite, les fils sont réunis et transportés sur un rouleau ou un convoyeur, qui applique un revêtement aqueux sur chaque fil. Les fils ainsi revêtus sont réunis en paquets, fil de base, pour traitement ultérieur.

**Le verre pour gobeletterie** est un autre secteur très diversifié, avec une grande gamme de produits et de procédés, allant du verre au plomb fabriqué main, à des produits en série pour la table, fabriqués avec des procédés mécanisés. Presque toutes les techniques de fusion, décrites ci-dessus, sont utilisées dans ce secteur, des fours à pots aux grands fours à récupération. Les procédés de formage peuvent être automatisés, manuels ou semi-automatiques et, en fonction du type de production, les articles de base peuvent être soumis à des opérations de finition à froid, par exemple, le verre au plomb est souvent découpé et poli.

**La production de verres spéciaux** est un autre secteur très diversifié, couvrant une grande gamme de produits dont la composition, la méthode de fabrication et l'utilisation peuvent varier énormément. Les techniques les plus courantes sont les fours à récupération, les fours oxycombustion, les fondoirs à verre électriques et les fours journaliers. La variété des produits qu'offre ce secteur procède de la diversité des techniques de formage utilisées. Parmi les plus importantes figurent la production par pression et soufflage, le laminage, la compression, la fabrication par rubans de verre, l'extrusion, le procédé d'extraction et la dissolution, silicate de sodium.

**Les fours pour la production de laine de verre** peuvent être le plus souvent électriques. Mais on utilise également des fours de récupération à gaz, ou des fours oxycombustion. Le verre fondu coule à travers un avant-creuset et à travers des roulements, à un seul orifice, dans un filateur de verre rotatif centrifuge. Le fibrage est obtenu par l'application d'une force centrifuge, avec atténuation par gaz inflammables. Une solution aqueuse de résine phénolique est ensuite vaporisée sur les fibres. La fibre revêtue de résine est ensuite transportée, par aspiration, sur un convoyeur, puis dans un four, où elle est séchée et purifiée.

**La laine de roche** est généralement produite dans des cubilots à vent chaud, alimentés au charbon. Le verre fondu est collecté, dans le fond du four, et coule, à travers une petite cuvette, dans la machine à filer. L'air est utilisé pour refroidir les fibres et pour les orienter vers les convoyeurs. Une solution aqueuse de résine phénolique est ensuite vaporisée sur les fibres, par une série de buses de vaporisation. Le reste du procédé est essentiellement identique à celui utilisé pour la laine de verre.

**Les fibres céramiques** sont produites exclusivement dans des fours électriques. La matière fondue est transformée en fibres, par des roues à haute vitesse ou par un jet d'air à haute pression. Ensuite les fibres sont transportées sur un convoyeur. Le produit peut être directement bottelé, à ce point du procédé, ou bien transformé en matelas de laine de verre, destiné à être mis en balles, en tant que produit fini, ou bien feutré. D'autres opérations de transformation en aval peuvent également être réalisées.

**La production de frites** utilise à la fois des fours en continu et de fours discontinus. Généralement, on produit de petits volumes, avec une grande gamme de formules différentes. Les fours pour la production de frites sont généralement alimentés au gaz naturel ou au pétrole et un grand nombre d'installations de production de frites se servent de fours oxycombustion. Les fours en continu peuvent être du type à brûleurs transversaux ou à boucle, avec un brûleur unique. Les fours discontinus sont des conteneurs, en forme de caisse ou cylindriques, avec revêtement interne



en matériau réfractaire, montés de façon à permettre une certaine rotation. La matière fondue peut être directement trempée dans un bac d'eau ou refroidie, à l'aide de rouleaux avec refroidissement à l'eau, afin d'obtenir un produit écaillé.

#### 4. Niveaux de consommation et d'émission

Le Chapitre 3 contient des informations concernant les plages de variation des consommations et des niveaux d'émission, constatés dans le secteur de la production du verre, en fonction des différents procédés et les différentes techniques, décrits au Chapitre 2. Les données de base et les résultats sont d'abord analysés, pour le secteur dans son ensemble, puis pour chacun des secteurs qui le composent. Les caractéristiques clé en matière d'émission, de sources d'émission et de consommation d'énergie sont également traitées dans ce chapitre. Les informations contenues dans ce chapitre devraient permettre d'analyser, dans leur contexte, les chiffres relatifs aux consommations et aux émissions, pour n'importe quel type d'usine pour laquelle une autorisation d'exploiter est demandée, en les comparant aux autres procédés utilisés dans le même secteur ou dans l'industrie du verre en général.

Les besoins nécessaires pour le procédé fondamental se divisent en quatre catégories, les matières premières, à savoir les matériaux qui composent les produits, l'énergie, combustibles et électricité, l'eau et les matériaux accessoires, matériel de transformation, produits de nettoyage, produits chimiques pour le traitement de l'eau, etc. Les matières premières, utilisées dans l'industrie du verre, sont des composés inorganiques en grande partie solides. Il peut s'agir de minéraux d'origine naturelle ou des produits fabriqués. Cela peut aller de matériaux bruts à des poudres très fines. Les liquides et les gaz sont également largement utilisés, aussi bien en tant que produits accessoires qu'en tant que combustibles.

Dans le document principal, le Tableau 3.1 indique la liste des matières premières les plus courantes, utilisées dans la production du verre. Les matières premières utilisées pour le formage du produit et les autres opérations en aval, entre autres revêtements et agglomérants, sont davantage spécifiques à chaque secteur et seront traitées dans d'autres chapitres. L'industrie du verre dans son ensemble ne consomme pas de grandes quantités d'eau, les principaux usages étant le refroidissement, le nettoyage et l'humidification intermittente. La fabrication du verre consomme beaucoup d'énergie et, partant, les combustibles représentent l'un des principaux postes de consommation, dans le procédé de production. Les principales sources d'énergie dans l'industrie du verre sont le fioul, le gaz naturel et l'électricité. L'énergie et les combustibles sont traités au Paragraphe 3.2.3, ainsi que dans les paragraphes spécifiques consacrés aux différents secteurs.

Les produits employés, dans le procédé de base, peuvent être répartis en cinq catégories principales, le produit lui-même, les émissions atmosphériques, les déchets liquides, eaux usées, les résidus solides et l'énergie.

Tous les secteurs de la production du verre utilisent des matières premières sous forme de poudre, de granulés ou de poussière. Le stockage et la manutention de ce type de matériaux représentent un potentiel non négligeable d'émission de poussières.

Les principaux problèmes rencontrés par l'industrie du verre en matière environnementale sont les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie. La fabrication du verre est une activité à haute température, à forte consommation d'énergie, qui provoque l'émission de produits de la combustion et de l'oxydation, à haute température de l'azote contenu dans l'atmosphère, par exemple le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions produites par les fours contiennent également des poussières et, en plus petites quantités, des métaux. On estime qu'en 1997 les émissions atmosphériques, produites par l'industrie du verre, auraient contenu 9 000 tonnes de poussières, 103 500 tonnes de NOx, 91 500 tonnes de Sox et 22 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, en incluant la génération d'énergie électrique. Cela représentait environ 0,7 % du total des émissions de ces substances, constaté dans l'Union Européenne. La consommation totale d'énergie de l'industrie du verre était

d'environ 265 PJ. Les principales émissions qui proviennent de la fusion dans la fabrication du verre figurent dans le tableau ci-dessous.

Emission	Source / Remarques
Particules	Condensation des composants volatiles du mélange. Présence de particules fines dans le mélange. Le produit de la combustion de certains combustibles fossiles.
Oxydes d'azote	NOx thermique dû aux températures de fusion élevées. Décomposition des composés de l'azote dans la composition. Oxydation de l'azote contenu dans les combustibles
Oxydes de soufre	Soufre contenu dans les combustibles. Décomposition des composés du soufre dans la composition. Oxydation d'acide sulfhydrique dans les opérations dans cubilot.
Chlorures/HCl	Présents en tant qu'impuretés dans certaines matières premières, en particulier dans le carbonate de sodium de synthèse. NaCl utilisé en tant que matière première pour la fabrication de certains verres spéciaux.
Fluorures/HF	Présents en tant qu'impuretés d'importance secondaire dans certaines matières premières. Ajoutés, en tant que matière première, dans la production de frites d'émail pour apporter certaines propriétés au produit fini. Ajoutés, en tant que matière première, dans la production de fibres de verre à fil continu et dans certaines compositions de verre afin d'améliorer la fusion ou d'apporter certaines propriétés au verre, par exemple l'opalescence. Lorsque des fluorures sont ajoutés à la composition, généralement sous forme de fluorure, les émissions non contrôlées peuvent être très élevées.
Métaux lourds ,par exemple V, Ni, Cr, Se, Pb, Co, Sb, As, Cd,	Présents, en tant qu'impuretés secondaires, dans certaines matières premières, calcins domestiques et carburants. Utilisés dans les fondants et dans les agents colorants dans le secteur de la production de frites, surtout le plomb et le cadmium. Utilisés dans certaines formules spéciales de verre, par exemple le verre au plomb et certains verres. Le sélénium est utilisé en tant que colorant, verre au bronze, ou en tant que décolorant dans certains verres transparents.
Dioxyde de carbone	Produit de la combustion. Emis après la décomposition de carbonates dans les mélanges de base, par exemple le carbonate de sodium, le calcaire.
Monoxyde de carbone	Produit d'une combustion incomplète, en particulier dans les cubilots à vent chaud
Acide sulfhydrique	Produit par les matières premières ou les sulfures présents dans les combustibles dans les cubilots à vent chaud, à cause de la réduction présente dans certaines parties du four.

### Récapitulatif des émissions atmosphériques produites par les opérations de fusion

Les émissions produites par les activités en aval peuvent beaucoup varier d'un secteur à l'autre et seront traitées dans les chapitres spécifiquement consacrés à chaque secteur. Bien qu'il existe des analogies entre les différentes techniques de fusion utilisées, dans de nombreux secteurs, les activités en aval sont spécifiques en général. Les émissions atmosphériques peuvent être produites par l'application des revêtements et/ou le séchage, les traitements secondaires, par exemple la découpe, le polissage etc., et par certaines opérations de formage, par exemple pour la laine de verre et les fibres céramiques.

En général, les émissions aqueuses sont relativement faibles et peu de problèmes sont spécifiques à l'industrie du verre dans ce domaine. Toutefois, certaines activités propres à certains secteurs doivent être analysées de manière plus approfondie et traitées, dans les chapitres consacrés aux différents secteurs, en particulier le verre pour gobeletterie, les verres spéciaux et les fibres de verre à fil continu.



L'une des caractéristiques communes à la plupart des secteurs est que la grande majorité des calcins produits à l'intérieur de l'usine, sont recyclés dans les fours. Les principales exceptions sont le secteur de la production de fibres céramiques, et celui de la fabrication de verres haut de gamme, dans les secteurs des verres spéciaux et du verre pour gobeletterie. Les secteurs de la laine de verre et des frites font ressortir des écarts importants, dans la quantité de déchets recyclés, dans les fours, allant de 0 à 100 %, pour certaines usines de production de laine minérale.

## **5, Les Techniques à examiner pour la définition des MTD (meilleures techniques disponibles)**

Une grande partie des secteurs qui composent l'industrie du verre utilise de grands fours en continu, avec des durées de vie pouvant aller jusqu'à 12 ans. Ces fours représentent un gros investissement initial et le fonctionnement du four en continu, ainsi que sa reconstruction périodique, représentent un investissement normal pour la fabrication. Les principales innovations technologiques peuvent être introduites de manière plus économique, si elles se font en même temps que la réfection des fours, ceci étant également le cas pour les mesures de réduction des émissions les plus complexes. Toutefois, de nombreuses améliorations dans le fonctionnement des fours, y compris la mise en place de techniques secondaires, peuvent être apportées sans gêner le fonctionnement habituel de l'usine.

Ce récapitulatif décrit brièvement les principales techniques employées, pour contrôler chaque substance émise, au cours des opérations de fusion et de certaines opérations en aval. Il traite principalement des émissions atmosphériques. Car ce sont, en général, les émissions les plus polluantes, produites par l'industrie du verre. Le Chapitre 4 fournit des descriptions détaillées de chaque technique, en indiquant les niveaux d'émission atteints, l'applicabilité des différentes techniques, les questions d'ordre financier, ainsi que les autres problèmes annexes.

### **Particules**

Les techniques employées, pour le contrôle des émissions de particules, comprennent des mesures secondaires, généralement des précipitateurs électrostatiques et des filtres à manches, et des mesures primaires.

Le précipitateur électrostatique, PE, est composé d'une série d'électrodes à décharge à haute tension et les électrodes collectrices correspondantes. Les particules sont chargées, puis séparées du flux de gaz, grâce à l'influence du champ électrique. Les PE sont extrêmement efficaces en ce qui concerne la collecte des poussières, comprises entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ , le pouvoir d'arrêt global étant compris entre 95 et 99 %. La performance effective varie principalement en fonction des caractéristiques des gaz d'échappement et de la structure du PE. En principe, cette technique est applicable à toutes les installations neuves ou déjà existantes, dans tous les secteurs de production du verre, sauf dans les cubilots à vent pour laine de roche, à cause des risques d'explosion. Les coûts seront probablement plus élevés pour les usines déjà existantes, en particulier là où il existe des problèmes d'espace.

Dans la plupart des applications, un PE de conception moderne, à deux ou trois étages, pourrait atteindre 20  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Avec des appareils à haut rendement ou dans des conditions particulièrement favorables, des niveaux d'émission inférieurs sont possibles. Les coûts varient beaucoup, en fonction des performances requises et du volume des gaz d'échappement. L'investissement, pour le polissage des gaz acides, est généralement compris entre 0,5 et 2,75 millions d'euros, avec des frais d'exploitation, allant de 0,03 à 0,2 millions d'euros par an.

Les systèmes, dotés de filtres à manches, utilisent une membrane perméable au gaz, capable de retenir les poussières. La poussière se dépose sur le tissu et à l'intérieur de celui-ci et, au fur et à mesure que la couche superficielle augmente, elle devient le principal moyen de filtrage. Le flux de gaz peut aller de l'intérieur du filtre vers l'extérieur, ou de l'extérieur vers l'intérieur. Les filtres en tissu sont extrêmement efficaces et on peut prévoir un pouvoir d'arrêt de 95 à 99 %.

On peut également atteindre des émissions de particules comprises entre  $0,1 \text{ mg/m}^3$  et  $5 \text{ mg/m}^3$  et on peut prévoir des niveaux sensiblement inférieurs à  $10 \text{ mg/m}^3$ , dans la plupart des applications. On peut avoir une importante capacité de réaliser des niveaux aussi bas, lorsque les poussières contiennent des quantités significatives de métaux et qu'on doit les réduire.

En principe, les filtres à manches peuvent s'appliquer à toutes les installations neuves ou déjà existantes, dans tous les secteurs de la production du verre. Toutefois, étant donné leur capacité à aveugler dans certaines circonstances, ils ne constituent pas le choix idéal dans toutes les applications. Dans la plupart des cas, il existe des solutions techniques à ce type de problème. Mais cela peut entraîner des frais. L'investissement et le coût d'exploitation sont sensiblement comparables à ceux des PE.

Les techniques de contrôle primaires se fondent essentiellement sur le changement de matières premières et la modification des fours et des dispositifs d'allumage. Dans la plupart des applications, les techniques primaires ne sont pas en mesure d'atteindre des niveaux d'émission comparables à ceux des filtres à manches et des PE.

### Oxydes d'azote (Nox)

Les techniques les plus appropriées, pour le contrôle des oxydes d'azote, Nox, sont généralement les mesures primaires, la fusion à l'oxygène, la réduction chimique par combustible, la réduction sélective catalytique et la réduction sélective non catalytique.

Les mesures primaires peuvent être réparties en deux catégories principales. Les modifications apportées à la combustion "traditionnelle" et des fours spécialement étudiés, ainsi que des modèles de combustion optimisés. La cuisson à oxycombustion fait également partie des techniques primaires. Mais, en raison de sa nature particulière, elle sera traitée à part. Les modifications apportées à la combustion traditionnelle se fondent généralement sur la réduction du rapport air/combustible, la réduction de la température de préchauffage, la combustion progressive et des brûleurs à faible production de NOx, ou bien en une combinaison de ces trois techniques. L'investissement est généralement peu important et les frais d'exploitation sont souvent réduits, en raison de la faible consommation de fuel et de l'amélioration de la combustion. Des progrès significatifs ont été réalisés dans ce domaine. Mais les réductions d'émission qu'on peut réaliser dépendent naturellement du point de départ. Une réduction de l'émission de NOx de l'ordre de 40 à 60 % n'est pas inhabituelle et des niveaux d'émission d'environ  $650$  à  $1100 \text{ mg/Nm}^3$  ont été constatés, dans certaines applications.

Des structures de fours spécifiques, capables de réduire les émissions de Nox, ont été développées, par exemple le fondoir à verre LoNOx. Ce type de four a rencontré un vif succès. Mais certaines contraintes, liées à la production, en limitent l'application. Le procédé FENIX est un système d'optimisation de la combustion, fondé sur des mesures primaires, qui peut être adapté à chaque type de four. Des résultats de  $510 \text{ mg/Nm}^3$  et d'environ  $1,1 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu ont été relevés. Mais le nombre d'exemples disponibles reste limité, au moment de la rédaction du présent document.

La cuisson à oxycombustion implique le remplacement de l'air de combustion par de l'oxygène. L'élimination d'une grande partie de l'azote de l'atmosphère de combustion réduit le volume des gaz d'échappement d'environ deux tiers. Par conséquent, des économies d'énergie sont possibles. Car il n'est pas nécessaire de réchauffer l'azote contenu dans l'atmosphère, jusqu'à la température des flammes. La formation de NOx thermique est réduite de manière significative, le seul azote présent dans l'atmosphère de combustion étant l'azote résiduel, présent dans l'oxygène/combustible, l'azote produit par la décomposition du nitrate et celui présent dans l'air parasite.

Le principe de la cuisson à l'oxycombustible est bien défini et, en théorie, on peut estimer qu'il est applicable à tout le secteur dans son ensemble. Toutefois, la technique est encore considérée, dans certains secteurs, en particulier celui de la production de verre plat et celui de la fabrication de verre pour gobeletterie, comme une technologie en cours de développement, comportant des

risques financiers potentiels. Un travail de développement considérable a été entrepris et cette technique est de plus en plus largement acceptée, au fur et à mesure que le nombre d'usines qui l'utilisent augmente. Les questions que soulève cette technique sont nombreuses et complexes. Elles sont traitées de façon détaillée au Chapitre 4. La compétitivité économique de cette technique dépend en grande partie du volume des économies d'énergie réalisées, et du coût relatif des autres techniques de réduction des émissions, par rapport au prix de l'oxygène. La viabilité technique et économique de cette technique dépend en grande partie de facteurs spécifiques, à chaque site de production.

La réduction chimique par combustible est représentée par toutes les techniques avec addition de combustible avec flux du gaz d'échappement, afin de réduire, par un procédé chimique, le NOx en N<sub>2</sub>, à travers une série de réactions. Le combustible ne brûle pas, mais il forme, par pyrolyse, des radicaux qui réagissent avec les composants des gaz d'échappement. Les deux principales techniques développées pour être utilisées dans l'industrie du verre sont le procédé 3R et le procédé de recalcination. L'application de ces deux techniques est actuellement limitée aux fours à récupération. Le procédé 3R a été entièrement développé pour être appliqué dans ce secteur, tandis que le procédé de recalcination a déjà été appliqué à l'échelle des usines, avec des résultats prometteurs. Le procédé 3R permet d'obtenir des niveaux d'émission inférieurs à 500 mg/Nm<sup>3</sup>, correspondant à une augmentation de la consommation de combustible de l'ordre de 6 à 10 %. Le procédé de recalcination devrait permettre d'obtenir des niveaux d'émission comparables, une fois que son développement sera terminé. L'augmentation de l'utilisation d'énergie, pour ces deux techniques, peut être réduite de manière significative, par l'utilisation de systèmes de récupération d'énergie et par l'association de ces techniques avec des mesures primaires.

La réduction sélective catalytique, SCR, consiste à faire réagir du NOx avec de l'ammoniaque, dans un lit catalytique, dont la température se situe autour de 400 °C. La plupart des applications dans l'industrie du verre nécessitent un système à 3 phases, avec réduction des poussières et polissage des gaz acides. Les systèmes sont généralement conçus pour réaliser des réductions comprises entre 75 et 95 %, et des niveaux d'émission sont généralement inférieurs à 500 mg/Nm<sup>3</sup>. Le coût de la SCR dépend principalement du volume des gaz d'échappement et de la réduction de NOx souhaitée. En général, l'investissement, en incluant le PE et le polissage, peut aller d'1 million à 4,5 millions d'euros, avec des coûts d'exploitation compris entre 0,075 et 0,5 millions d'euros par an. En principe, la SCR peut être appliquée à la majorité des procédés de production du verre, ainsi qu'à des installations nouvelles ou déjà existantes. Toutefois, un certain nombre de problèmes pourraient limiter les possibilités d'application de la technique dans de nombreux cas. Par exemple, cette technique ne s'est pas révélée positive pour les grands fours à fioul, ainsi que pour la production de laine de verre et de fibres de verre à fil continu.

La réduction sélective, non catalytique, SNCR, fonctionne sur les mêmes bases que la SCR. Mais les réactions ont lieu à une température plus élevée, de 800 à 1100°C, sans qu'un catalyseur soit nécessaire. La SNCR ne requiert ni la réduction des poussières, ni le polissage des gaz acides. Des pouvoirs d'arrêt de l'ordre de 30 à 70 % peuvent être généralement obtenus, le facteur critique étant la disponibilité d'une quantité suffisante d'ammoniaque à la bonne température. L'investissement est de l'ordre de 0,2 à 1,35 millions d'euros. Tandis que le coût d'exploitation peut varier entre 23 000 et 22 5000 euros par an, en fonction des dimensions du four. En principe, cette technique est applicable à tous les types de production du verre, y compris les nouvelles usines et celles déjà existantes. La principale limite à l'application de la SNCR est de savoir si le réactif peut être introduit dans le système des gaz d'échappement au bon moment, pour que la bonne température puisse être maintenue, pendant un temps de réaction suffisant. Ceci est particulièrement important dans des usines déjà existantes et pour des fours à récupération

### **Oxydes de Soufre, SOx**

Les principales techniques de contrôle des émissions de SOx sont le choix du combustible, la formule de la composition de base et le polissage du gaz sulfureux.

Dans les procédés avec chauffe au fioul, la principale source de SOx est l'oxydation du soufre dans le combustible. La quantité de Sox, provenant de la composition, varie en fonction du type de verre. Mais, en général, quel que soit le type de fioul brûlé, les émissions de SOx provenant du combustible dépassent celles produites par la composition. La manière la plus naturelle de réduire les émissions de SOx est de réduire le contenu de soufre présent dans le combustible. Le fioul a différents taux de soufre, <1 %, <2 %, <3 % et >3 %. Tandis que le gaz naturel est essentiellement exempt de soufre. Le passage à un combustible à plus faible contenu de soufre ne donne généralement pas lieu à une augmentation des coûts, en dehors de l'augmentation du prix du combustible. Le passage au gaz requiert l'installation de brûleurs différents, ainsi que toute une série de modifications. Les prix des différents combustibles varient substantiellement dans le temps et selon les Etats Membres. Mais, en général, les combustibles à faible contenu de soufre sont plus chers. Comme expliqué au chapitre 5, en raison des problèmes d'ordre financier et politique, liés au prix des combustibles et à leur disponibilité, nous avons estimé que la question du choix du carburant ne faisait pas partie de l'objet du présent document. Toutefois, lorsqu'on brûle du gaz naturel, les émissions de SOx sont généralement plus faibles, et lorsqu'on brûle du soufre, un niveau de soufre de 1% ou inférieur est considéré comme une MTD. L'utilisation de combustibles à plus haut contenu de soufre peut également être considérée comme une MTD, si on utilise un système de réduction pour obtenir des niveaux d'émission équivalents.

Dans la fabrication traditionnelle du verre, les sulfates constituent la principale source d'émission de Sox, provenant des mélanges de base. Les sulfates sont les agents affineurs les plus largement utilisés et ce sont également des agents oxydants très importants. Dans la plupart des fours modernes, destinés à la production de verre, les niveaux des sulfates, provenant des mélanges de base, ont été réduits aux niveaux minimums praticables, qui varient en fonction du type de verre. Les questions relatives à la réduction des sulfates, provenant des mélanges de base, sont traitées au Paragraphe 4.4.1.1, tandis que les problèmes liés au recyclage des poussières provenant des filtres/PE font l'objet du Paragraphe 4.4.3.3.

Dans la production de laine de roche, les émissions de SO<sub>2</sub>, en dehors du charbon, proviennent en grande partie de l'utilisation de scories, des hauts fourneaux et de briquettes de béton colcrete, dans les mélanges de base. La disponibilité de charbon et de scories, à faible contenu de soufre, est limitée à cause du manque de sources d'approvisionnement possibles, dans un périmètre économiquement rentable. Les scories peuvent généralement être éliminées de la composition des mélanges de base, à l'exception de la production de quantités limitées de "fibres blanches", destinées à des applications spécifiques. L'utilisation de briquettes de béton colcrete impose de trouver un équilibre entre la minimisation des déchets et la réduction des émissions de Sox, qui dépendra souvent de priorités spécifiques et doit être associée à l'application du polissage des gaz acides. Cette question est traitée de façon détaillée, aux chapitres 4 et 5 du document principal.

Les principes de fonctionnement du polissage à sec et ceux du polissage par voie demi-sèche, sont les mêmes. Le réactif, l'agent absorbant, est introduit et dispersé dans le flux de gaz. Cette substance réagit avec le Sox, pour former une substance solide, qui doit être extraite du flux du gaz, à l'aide d'un précipitateur électrostatique ou d'un système de filtres à manches. Les absorbants choisis, pour extraire le Sox, servent également à éliminer d'autres gaz acides. Dans le procédé à sec, l'absorbant est une poudre sèche, généralement du Ca (OH)<sub>2</sub>, NaHCO<sub>3</sub> ou du Na<sub>2</sub> (CO)<sub>3</sub>. Dans le procédé par voie demi-sèche, l'absorbant, en général du Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, du CaO ou du CaOH<sub>2</sub>, est ajouté sous forme de suspension ou de solution, tandis que l'évaporation de l'eau refroidit le flux de gaz. Les réductions obtenues, avec les différentes techniques, dépendent d'un grand nombre de facteurs, y compris la température des gaz d'échappement, la quantité et le type d'absorbant ajouté, ou plus précisément, le rapport molaire entre le réactif et les agents polluants, et la dispersion de l'absorbant. Le paragraphe 4.4.3.3, décrit les taux de rendement obtenus, avec différents absorbants et procédés.

Le recyclage complet des poussières des filtres, y compris les résidus de sulfates, est souvent considéré comme une solution raisonnable du point de vue économique et environnemental, à condition qu'il soit possible techniquement. La réduction globale des émissions de SOx est limitée, par des considérations ayant trait au bilan massique, à la réduction à la source qu'on obtient en remplaçant le sulfate par un filtre à poussières, dans les matières premières. Naturellement, cela vient s'ajouter aux autres mesures primaires, nécessaires pour réduire l'apport en soufre. Par conséquent, afin de réduire les émissions de gaz acides, il pourrait être nécessaire de prendre en considération la possibilité d'éliminer les déchets à l'extérieur, du moins en ce qui concerne une partie des matières collectées. La définition de la meilleure protection environnementale dans sa globalité peut dépendre parfois de considérations locales et impliquer le besoin de faire le point des priorités potentiellement contradictoires, telles que la réduction des déchets au minimum et la réduction des émissions de Sox. Dans ce cas, il sera nécessaire d'atteindre un équilibre du taux de soufre utilisé, dans les procédés de production, pour définir des niveaux d'émission compatibles avec les MTD.

Avec le recyclage des poussières, par filtre en circuit fermé, le niveau des émissions de SOx observé actuellement est généralement compris entre 200 à 800 mg/Nm<sup>3</sup>, pour la cuisson au gaz naturel, et 800 à 1600 mg/ Nm<sup>3</sup>, avec 1 % S, pour le fioul. La majorité des systèmes avec polissage du SOx utilisent un polissage au calcaire à sec, à une température d'environ 400 °C, qui constitue la température des gaz d'échappement, obtenue avec un four à récupération fonctionnant parfaitement. A cette température, on peut réaliser une réduction du SOx d'environ 50 %. On peut atteindre un niveau de réduction encore supérieur, avec des températures de l'ordre de 200 °C, et dans une atmosphère humide. Mais cela engendre d'autres problèmes.

Le polissage au SOx est un secteur extrêmement complexe qui a provoqué un important débat, au sein du groupe de travail technique. Il est donc essentiel d'examiner, de manière approfondie, les arguments et les explications, figurant aux chapitres 4 et 5.

### **Fluorures (HF) et Chlorures(HCl)**

Les émissions de HF et de HCl sont générées, la plupart du temps, par la volatilisation des fluorures et des chlorures, présents dans les mélanges de base, sous la forme d'impuretés, ou parce qu'ils y ont été ajoutés, pour obtenir des caractéristiques ou des propriétés spécifiques pour le verre. Les principales techniques pour la réduction de ces émissions sont la modification de la composition ou le polissage. Lorsque les halogénures sont présents sous forme d'impuretés, les émissions peuvent généralement être contrôlées, en sélectionnant les matières premières. Bien que le polissage soit souvent utilisé, lorsque la sélection des matières premières n'est pas suffisante, ou lorsqu'on l'utilise pour contrôler d'autres substances. Lorsque les halogénures sont utilisés pour apporter des caractéristiques spécifiques au produit fini, on peut avoir recours à deux principales solutions, le polissage ou la reformulation du composition, pour obtenir les mêmes caractéristiques par d'autres moyens. Des résultats particulièrement positifs ont été obtenus par la reformulation, dans la production de fibres de verre à fil continu.

### **Emissions provenant d'activités autres que la fusion**

Les émissions créées par les opérations en aval sont spécifiques à chaque secteur et sont décrites de manière détaillée au Paragraphe 4.5 du document principal. A l'exception du secteur de la laine de roche, les émissions sont généralement inférieures à celles produites par les opérations de fusion. Les techniques de réduction se fondent généralement sur des techniques de dépoussiérage traditionnel ou de dépoussiérage par voie humide, avec un certain degré d'oxydation thermique.

Dans le procédé de production de la laine de roche, les émissions proviennent en grande partie de l'application et du traitement thermique de systèmes d'encollage à base de résine organique. Les techniques de contrôle de ce type d'émission sont traitées de façon détaillée au paragraphe 4.5.6 du document principal.



### Les émissions dans l'eau

En général, les émissions dans l'eau sont relativement faibles et peu de questions importantes dans ce domaine concernent l'industrie du verre. L'eau est principalement utilisée pour des opérations de nettoyage et de refroidissement et elle peut être rapidement recyclée ou traitée, en ayant recours à des techniques standard. Des problèmes spécifiques de contamination organique peuvent naître de la fabrication de la laine de roche et de fibres de verre à fil continu. Des problèmes liés aux résidus de métaux lourds, notamment le plomb, peuvent être causés par la production de verres spéciaux, de frites et de verre pour gobeletterie. Le tableau ci-dessous montre les principales techniques possibles, pour le contrôle des émissions dans l'eau.

<b><u>Traitement Physique/Chimique</u></b> <ul style="list-style-type: none"><li>• tamisage</li><li>• écumage</li><li>• tassement</li><li>• centrifugeuse</li><li>• filtration</li></ul> <b><u>Traitement biologique</u></b> <ul style="list-style-type: none"><li>• boues activées</li><li>• biofiltration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• neutralisation</li><li>• aération</li><li>• précipitation</li><li>• coagulation et floculation</li></ul>
--	--






### Liste des techniques d'épuration des eaux usées applicables dans l'industrie du verre

#### Déchets solides

L'une des caractéristiques de la production du verre est qu'elle génère une quantité de déchets solides relativement négligeable. La plupart des procédés n'ont pas d'écoulements importants de produits inhérents. Les principaux résidus des différents procédés sont les matières premières inutilisées, des calcins qui n'ont pas été transformés en produit fini et des produits mis au rebut. Les autres déchets solides sont les déchets de matériaux réfractaires et les poussières, collectées dans les équipements de réduction, ou dans les fondants. Les déchets non fibreux sont, en général, immédiatement recyclés, dans le procédé, et les techniques de recyclage des autres déchets sont en cours de développement. Le recyclage des déchets est en train de s'étendre de manière significative, au fur et à mesure que les incitations financières se développent, et notamment à la suite de l'augmentation du coût d'élimination des déchets. Les résidus du procédé principal, générés par la production du verre, ainsi que les techniques utilisées pour les contrôler, font l'objet du Paragraphe 4.7, du document principal.

#### Energie

La fabrication du verre implique une forte consommation d'énergie. Par conséquent, le choix des sources d'énergie, des techniques de chauffage et des méthodes de récupération de la chaleur, est un élément essentiel, à prendre en compte, en ce qui concerne le type de four et la rentabilité économique du procédé de production. Ces mêmes choix constituent également des facteurs importants pour les performances environnementales et pour la maîtrise de la consommation d'énergie des opérations de fusion. En général, l'énergie nécessaire pour fondre le verre représente environ 75 % de la consommation d'énergie, dans la fabrication du verre. Le coût de l'énergie nécessaire au procédé de fusion est l'un des postes les plus importants des coûts d'exploitation des usines de production du verre et des incitations significatives ont été mises en place, pour favoriser la réduction de la consommation d'énergie de la part des opérateurs. Les principales techniques utilisées, pour réduire la consommation d'énergie, figurent ci-dessous et seront traitées de manière détaillée dans le document principal.



- La technique de fusion et la structure du four, régénérateurs thermiques, fours à récupération, fusion électrique, combustion oxycombustion et boosting électrique,
- Le contrôle de la combustion et le choix du combustible, brûleurs à bas taux de Nox, combustion stœchiométrique, cuisson au fioul/au gaz,
- Utilisation de calcin
- Chaudières à récupération
- Préchauffage des calcin/du mélange

## 6. Récapitulatif des MTD - Conclusions

Le chapitre 5 présente les conclusions, relatives aux meilleures techniques disponibles, pour réaliser la prévention et le contrôle intégrés de la pollution, dans l'industrie du verre. Ce chapitre contient une introduction, un paragraphe général, ainsi que des conclusions spécifiques pour chaque secteur de production. Les “ MTD générales”, mentionnées au chapitre 5 pourraient être utilisées pour juger les performances actuelles, d'une usine existante, ou bien pour évaluer une proposition relative à une nouvelle installation, en servant de base à la détermination des meilleures techniques disponibles, à mettre en place pour cette nouvelle usine. Les chiffres présentés ne constituent pas des valeurs limite d'émission, et ne doivent donc pas être interprétés dans ce sens. Les valeurs limite d'émissions appropriées devront être définies, pour chaque cas spécifique, en prenant en compte les objectifs de la Directive PCIP, ainsi que les considérations d'ordre local.

Le chapitre 5 est le fruit d'un long débat et il a été reformulé plusieurs fois par le Groupe de travail technique. Le contexte et les nuances contenus dans les conclusions sont extrêmement importants et il est difficile de pouvoir synthétiser ce chapitre, sans dénaturer ces questions et sans prendre en compte les efforts et le débat qui ont été nécessaires, pour définir la position adoptée actuellement. Ce récapitulatif résume les principales conclusions du chapitre 5. Mais il faut lire le document en entier, en particulier, le texte du chapitre 5, dans son intégralité, pour bien comprendre tous les aspects de la question.

Cette synthèse souligne un certain nombre de questions, communes à tous les secteurs de la production du verre, tout en récapitulant les principales conclusions générales, principalement pour les substances utilisées. L'une des conclusions les plus importantes de ce travail est qu'en raison de la grande diversité qui caractérise l'industrie du verre, il est souvent inapproprié d'identifier des techniques particulières. L'approche générale, appliquée au chapitre 5, est d'identifier des niveaux de performance indicatifs des meilleures techniques disponibles, tout en reconnaissant que la meilleure façon d'atteindre ces niveaux peut varier, en fonction des procédés.

### Généralités

L'une des caractéristiques les plus significatives d'un grand nombre d'installations, dans le secteur du verre, est la réfection périodique des fours, dont l'ampleur peut, toutefois, varier selon les cas. Le fait de coordonner l'application d'un certain nombre de techniques de réfection peut comporter certains avantages d'ordre technique et financier. Mais ce n'est pas toujours le cas. Dans le cycle de réfection, l'ancienneté du four constitue un élément important, pour la définition des opérations à mettre en place, en termes de meilleures techniques générales.

Les conditions de référence pour le chapitre 5 sont :

- En ce qui concerne les gaz de combustion : absence d'humidité, température de 0°C ,273 K, pression de 101,3 kPa, 8 % d'oxygène par volume, fusion continue,, 13 % d'oxygène par volume, fusion discontinue. Pour les systèmes oxycombustion, la correction des émissions à 8 % d'oxygène, n'est pas très significative, et les émissions de ces systèmes devraient être examinées en termes de masse.

- Pour les autres gaz, y compris les émissions provenant du traitement thermique et des fours de séchage sans incinération des gaz résiduels, température de 0°C , 273 K, pression de 101,3 kPa, sans correction de l'oxygène ou de la concentration de vapeur d'eau.

Dans le document principal, les niveaux d'émission, associés aux MTD, sont présentés sous la forme de plages de valeurs, à la fois pour la concentration des émissions , en  $\text{mg/m}^3$ , et les émissions en masse, en kg/tonne de verre fondu. Afin de permettre la comparaison entre les différentes techniques et de fournir une indication de l'impact de celles-ci sur l'environnement. Pour les fours alimentés au combustible fossile, le rapport entre la masse et la concentration dépend, en grande partie, de la consommation d'énergie, qui provient du procédé de fusion, qui varie considérablement, en fonction de toute une série de facteurs dont la technique de fusion employée, la taille du four et le type de verre. Etant donné cette diversité, il est extrêmement difficile de mettre directement en relation les chiffres relatifs aux émissions et ceux relatifs aux émissions massives, sans présenter des fourchettes de valeurs aussi vastes qu'elles diminuent la fiabilité des résultats proposés. Par conséquent, nous avons choisi comme approche celle consistant à donner des chiffres relatifs aux concentrations, en tant que base pour la détermination des meilleures techniques et à utiliser des facteurs indicatifs de conversion, basés sur des fours modernes à basse consommation d'énergie, pour calculer les chiffres relatifs aux émissions massives qui "correspondent généralement" à ces niveaux de concentrations.

Dans ce récapitulatif, les niveaux d'émission, par rapport aux meilleures techniques disponibles, sont exprimés uniquement sous forme de concentration. La seule exception est constituée par des techniques telles que la cuisson oxycombustion, pour lesquelles les émissions massives sont la façon la plus claire de définir le niveau de performances. En ce qui concerne le rapport masse par tonne de verre fondu, il conviendra de se rapporter à l'analyse des facteurs de conversion, au Paragraphe 5.2, ainsi qu'aux paragraphes consacrés aux différents secteurs au chapitre 5.

### Particules/Poussière

Les conclusions relatives aux émissions de poussières, synthétisées dans le paragraphe ci-dessous, sont tout à fait comparables pour tous les secteurs, à l'exception de deux cas d'importance secondaire. Pour les fibres céramiques, le niveau d'émission associé aux Meilleures Techniques, a été fixé à moins de  $10 \text{ mg/Nm}^3$ , en raison de la nature des particules. Pour les frites, les conclusions générales sont celles indiquées ci-dessous, étant bien entendu que pour certaines installations des améliorations sont nécessaires, afin d'atteindre ces niveaux.

De manière générale, les MTD pour le contrôle des émissions de poussières produites par les fours, dans le secteur de la production du verre, impliquent l'utilisation d'un précipitateur électrostatique, ou d'un système de filtres à manches, éventuellement combinés avec des systèmes de polissage des gaz acides à sec ou par voie demi-sèche. Le niveau d'émission par rapport aux MTD associés, à ce type de techniques est de 5 à  $30 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui correspond, en général, à 0,1 kg/tonne, de verre fondu. Les valeurs les plus faibles, dans la fourchette mentionnée ci-dessus, sont en général celles obtenues avec des filtres à manches. Ces chiffres font référence à une période moyenne de 30 minutes minimum et 24 heures maximum. Dans certains cas, l'application des MTD aux émissions de métaux peut provoquer une diminution des émissions de poussières.

Des divergences d'opinion se sont manifestées au sein du Groupe de Travail Technique, pour savoir si les effets bénéfiques pour l'environnement de la réduction secondaire des émissions de poussières justifiaient, dans tous les cas, les frais élevés nécessaires, pour obtenir une telle réduction. Toutefois, on est arrivé à la conclusion générale que la réduction secondaire des poussières constitue une MTD, pour la plupart des fours, sauf si des résultats équivalents peuvent être obtenus par l'application de mesures primaires. Le pour et le contre, des techniques primaires et secondaires, sont traités de manière exhaustive aux paragraphes 4.4.1.7 et 5.2.2.

### Oxydes d'Azote

Il s'agit de l'une des substances pour lesquelles il est extrêmement difficile d'atteindre des conclusions sûres, concernant les MTD. Il est, en particulier, difficile de définir des niveaux d'émission communs, pouvant s'appliquer à plus d'un secteur spécifique. Par conséquent, les chiffres donnés dans ce paragraphe doivent être considérés exclusivement comme une synthèse des conclusions présentées au chapitre 5. Il serait donc totalement faux de se fonder sur les informations données, dans ce récapitulatif, pour définir les conditions associées aux MTD, sans se rapporter au document principal. Car cela reviendrait à analyser les chiffres en dehors de leur contexte spécifique, ce qui pourrait amener à fixer des points de repère ou des termes de comparaison trop laxistes ou, au contraire, trop sévères.

Pour les oxydes d'azote, le choix des techniques représentant les MTD dépendra en grande partie de questions spécifiques à chaque usine, notamment la technique de fusion utilisée et l'ancienneté du four. Certaines techniques peuvent donner des résultats différents, selon les applications et peuvent entraîner des coûts différents, selon les conditions présentes sur le site de production.

En ce qui concerne le verre d'emballage, le verre plat, les verres spéciaux, y compris le silicate de sodium, la laine de roche et les frittés, on considère que le niveau d'émission d'oxydes d'azote, exprimé par le symbole  $\text{NO}_2$ , associé aux techniques généralement considérées comme MTD, devrait être de 500 à 700  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ . Bien que le niveau d'émission, associé aux MTD, soit généralement le même, les techniques qui peuvent être utilisées, pour obtenir ce niveau, leurs coûts, ainsi que les problèmes d'application, varient d'un secteur à l'autre.

Dans de nombreuses situations, un examen plus approfondi est nécessaire et le niveau d'émission, indiqué ci-dessus, pourrait se révéler inadéquat. Par exemple, lorsque le procédé nécessite l'emploi de nitrates, lorsqu'on utilise certains matériaux recyclés ou lorsqu'un four approche de la fin du cycle. Toutes ces considérations, très importantes, sont traitées dans les paragraphes spécifiquement consacrés aux différents secteurs au chapitre 5.

Au moment de la rédaction du présent document, le secteur des fibres de verre à fil continu traverse une période de transition, en ce qui concerne le contrôle du  $\text{NO}_x$ , ce qui ne facilite pas la formulation de conclusions de MTD sûres. La technique la plus prometteuse semble être la fusion à l'oxygène, bien que des résultats encourageants aient été obtenus, par l'application de mesures primaires, et qu'il n'y ait aucun obstacle technique majeur à l'application de la SNCR. Généralement, dans ce secteur, la MTD pour la réduction des émissions d'oxyde d'azote,  $\text{NO}_2$ , semble être la fusion à l'oxygène. Tandis que le niveau d'émission associé à cette MTD se situe autour de 0,5 à 1,5  $\text{kg}/\text{tonne}$  de verre fondu. Cette affirmation ne constitue pas une conclusion définitive, mais plutôt un bilan, basé sur les informations disponibles, au moment de la rédaction du présent document. Il est généralement reconnu que cette technique comporte un certain risque financier. Mais elle devrait être de plus en plus souvent acceptée, en tant que MTD, à moyen terme. Lorsque d'autres techniques sont applicables, le niveau d'émission MTD, comparable pour les fours à aérogaz, se situe autour de 500 à 700  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .

De même, il est difficile de présenter des conclusions définitives, pour les niveaux d'émission de  $\text{NO}_x$ , dans le secteur du verre pour gobeletterie. Certaines questions, spécifiques à ce secteur, doivent être prises en considération, en ce qui concerne le choix des techniques de contrôle des émissions de  $\text{NO}_x$ . Certaines de ces questions peuvent être illustrées, en comparant ce secteur à celui du verre d'emballage, qui implique des contraintes potentielles, plus importantes en termes de qualité, des volumes de production moins élevés, des fours en moyenne plus petits, des restrictions en ce qui concerne l'utilisation du calcin, des températures plus élevées et des cycles plus longs. Tous ces facteurs entraînent une consommation d'énergie plus élevée, tout en augmentant la formation possible de  $\text{NO}_x$ . En général, lorsque la fusion électrique, à 100 % ou à plus de 50 %, est viable d'un point de vue financier et surtout pour la production du cristal au plomb 24%, du cristal et de l'opale, cette technique est considérée comme MTD. Dans ce cas, le niveau d'émission, associé aux MTD, serait généralement de 0,2 à 1,0  $\text{kg}/\text{tonne}$  de verre fondu.

Lorsque la fusion électrique n'est pas viable, d'un point de vue financier, on peut utiliser toute une série d'autres techniques. Dans le secteur du verre pour gobeletterie, on emploie une grande variété de types de fours et la technique la plus adéquate dépend en général des conditions présentes, sur le site de production. On considère que, étant donné le temps nécessaire pour le développement et l'application des différentes techniques, le niveau d'émission conseillé pour les oxydes d'azote, NO<sub>2</sub>, associé aux MTD, serait compris entre 500 et 700 mg/Nm<sup>3</sup>, ou pour la fusion à l'oxygène, entre 0,5 et 1,5 kg/tonne de verre fondu. Ceci dans le cas de l'utilisation de mesures primaires, modification de la combustion, ou d'une combinaison de mesures primaires, allumage oxycombustion, SNCR, SCR ou 3R/recalcination, uniquement pour les fours à récupération.

Les cubilots à vent, pour la production de laine de verre, ne génèrent pas en général, d'importantes émissions de NO<sub>x</sub> et on peut atteindre des émissions inférieures à 0,5 kg/tonne de verre fondu, sans appliquer des contrôles spécifiques. Lorsqu'on utilise des fours à bassin, le niveau d'émission, associé aux MTD, devrait être équivalent à celui généré pour la production de laine de verre. Les fibres céramiques sont exclusivement produites avec des fours électriques et l'émission de NO<sub>x</sub> est généralement largement inférieure à 0,5 kg/tonne de verre fondu.

### Oxydes de soufre

La détermination du niveau d'émission, associé aux MTD, pour chaque secteur, est une question complexe, avec de nombreux facteurs interactifs, qui dans certains cas sont contradictoires. Ces questions seront traitées de manière exhaustive aux chapitres 5 et 4, les informations présentées dans ce paragraphe n'étant qu'une synthèse fournie à titre indicatif.

Le choix du combustible et le niveau de soufre sont deux éléments d'une importance fondamentale. Par conséquent, les éléments relatifs aux fours à fioul et au gaz sont examinés séparément. De plus, certaines formulations, et en particulier les verres à base de chaux sodée, exigent l'utilisation de sulfates, dans la composition, et naturellement, ce type de formules tend à provoquer des niveaux d'émission de SO<sub>2</sub> plus élevés.

On considère que dans la plupart des cas, les MTD, relatives aux émissions de poussières, impliquent la mise en place de systèmes de réduction des poussières, incluant souvent des systèmes de polissage des gaz acides. Ceci est pris en compte dans la détermination des niveaux d'émission, associés aux MTD, proposés au chapitre 5. Les déchets, contenant des sulfates, peuvent généralement être recyclés, en même temps que les matières premières utilisées dans le four, afin d'éviter la production d'un flux de déchets solides. Toutefois, l'action d'absorption des sulfates par le verre est limitée et le système peut rapidement atteindre un point où une grande partie du soufre recyclé est réémise. Par conséquent, dans le recyclage complet des poussières, l'effet de désulfuration, produit par le dépoussiérage, peut être limité par la capacité du verre à absorber le soufre.

Afin de réduire ultérieurement les émissions de SO, il convient donc, de prendre en considération la possibilité d'une élimination externe des déchets ou, si possible, une réduction du niveau de soufre, contenu dans les combustibles. Les choix possibles d'un point de vue économique, pour recycler les déchets, en dehors du site de production, sont extrêmement limités et l'option la plus probable semble être la décharge publique. Ce qui crée un flux de déchets solides. Pour une approche environnementale intégrée, il faut prendre en considération le niveau de priorité relative de la réduction des émissions de SO<sub>2</sub> et la génération potentielle de déchets solides. Par conséquent, la méthode la plus appropriée pourra varier en fonction des procédés et, pour cette raison, les niveaux d'émission sont ici présentés, d'un côté, pour les situations où la réduction de SO<sub>2</sub> est prioritaire et pour celles où la réduction des déchets solides est prioritaire. Dans la réalité, il existe un grand nombre de cas où on peut atteindre le niveau le plus faible d'émission, par le recyclage complet des poussières.

Vous trouverez, dans le tableau ci-dessous, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour chaque secteur, ainsi que pour les différentes situations particulières. Nous soulignons, encore

une fois qu'il s'agit d'un récapitulatif donné à titre indicatif et que l'on doit se rapporter au chapitre 5, pour pouvoir examiner la question de manière approfondie, sous tous ses aspects.

Secteur	niveaux d'émission associées aux MTD ,mgSO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> ,		Remarques
	fours à gaz	fours à fioul	
verre pour récipients avec réduction de SO <sub>2</sub> prioritaire	200 à 500	500 à 1 200	
verre pour récipients avec réduction des déchets solides prioritaire	< 800	< 1500	où le bilan massique ne permet pas d'atteindre les valeurs susmentionnées
verre plat avec SO <sub>2</sub> réduction prioritaire	200 à 500	500 à 1 200	
verre plat avec réduction des déchets solides prioritaire	< 800	< 1 500	Où le bilan massique ne permet pas d'atteindre les valeurs susmentionnées.
Fibres de verre à fil continu	< 200	500 à 1000	Si la composition contient des sulfates, les fours à gaz peuvent aller jusqu'à 800. Pour les fours à fioul, les valeurs les plus élevées se rapportent au recyclage des poussières
Verre pour gobeletterie	200 à 500	500 à 1300	Si le mélange contient une faible quantité de sulfates, <200 pour les fours à gaz. Les valeurs les plus élevées se rapportent au recyclage des poussières.
Verres spéciaux y compris le silicate de sodium	200 à 500	500 à 1200	Les valeurs les plus élevées se rapportent au recyclage des poussières.
Laine de verre	généralement <50	300 à 1000	En général, verre à faible contenu de sulfates.
Laine de roche ,fours à charbon, avec réduction des déchets et recyclage prioritaires.	(a) < 600 (b) < 1100 (c) < 1400		(a) Four chargé avec roche (b) 45 % de briquettes de béton colcrete (c) Briquettes et poussière filtrée
Laine de roche, fours à charbon, avec réduction de SO <sub>2</sub> prioritaire	(a) < 200 (b) < 350 (c) < 420		(d) Four chargé avec roche (e) 45 % de briquettes de béton (a) Briquettes et poussière filtrée
Fibres céramiques ,Fusion électrique	< 0.5 kg/tonne de verre fondu		Fours électriques uniquement, la concentration dépend des différentes situations.
Frittes	< 200	500 à 1000	La cuisson au fioul est rare

**Synthèse des niveaux d'émission d'oxydes de soufre, SO<sub>2</sub>, associés aux MTD, donnée à titre indicatif**

### **Autres émissions provenant de la fusion**

Chacun des paragraphes, spécifiques du chapitre 5, consacrés aux différents secteurs, comporte un sous-paragraphe qui traite d'autres émissions, provenant des opérations de fusion, en dehors des poussières, du NO<sub>x</sub> et du SO<sub>x</sub>. Les plus importantes, parmi ces "autres émissions", sont représentées, en général, par les chlorures, HCl, les fluorures, HF, ainsi que les métaux et leurs composés. Certains types de métaux sont regroupés dans deux catégories distinctes, le Groupe 1 ou le Groupe 2. Les métaux qui ne rentrent pas dans ces deux groupes sont traités chacun séparément, en raison de leur degré élevé de toxicité, ou alors ils sont classés dans la catégorie

des poussières. Car leur faible niveau de toxicité ne nécessite pas une analyse spécifique. Les deux groupes figurent dans le tableau ci-dessous.

Métaux et composés Groupe 1	Métaux et composés Groupe 2
Arsenic	Antimoine
Cobalt	Plomb
Nickel	Chrome III
Sélénium	Cuivre
Chrome VI	Manganèse
	Vanadium
	Etain

### Classification des métaux et de leurs composés

Les conclusions relatives aux MTD, pour la majorité des secteurs, concernant ces substances, sont sensiblement les mêmes. Les MTD, applicables pour contrôler ce type d'émission, sont la sélection des matières premières, en vue de la réduction des émissions, et le polissage des gaz acides, si nécessaire. Le polissage des gaz acides peut ne pas être nécessaire, dans certains cas, soit pour protéger les équipements de réduction, soit pour obtenir les valeurs données, pour les SOx. Dans ce cas, le polissage des gaz acides est considéré comme une MTD, lorsque les niveaux mentionnés ci-dessous ne peuvent être atteints par l'application de mesures primaires. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les produits polluants mentionnés ci-dessous devraient être :

- Chlorures (HCl) <30 mg/Nm<sup>3</sup>
- Fluorures (HF) <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux (gaz + phase solide, Groupe 1 + Groupe 2) <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux (gaz + phase solide, Groupe 1) <1 mg/Nm<sup>3</sup>

Dans les secteurs des frites et des verres spéciaux, on rencontre, dans certains cas, des émissions de cadmium et de thallium. Le niveau d'émission associé aux MTD, pour ces métaux et pour leurs composés est de <0,2 mg/Nm<sup>3</sup>. Pour la production de fibres de verre à fil continu, le niveau d'émission, associé aux MTD, est de 5 à 15 mg/Nm<sup>3</sup>. Les valeurs les plus faibles, comprises dans cette fourchette, se rapportent aux compositions ne contenant pas de fluorures et les valeurs les plus élevées, aux compositions à base de fluorures.

Dans le secteur de la production de la laine de roche, les niveaux d'émission associés aux MTD sont également donnés pour le monoxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène et correspondent, respectivement, à <200 mg/Nm<sup>3</sup> et < 5 mg/Nm<sup>3</sup>.

### Procédé en aval

Les procédés en aval varient selon les secteurs et les installations utilisées. Il convient donc, de se rapporter aux paragraphes consacrés aux différents secteurs au chapitre 5. Toutefois, sauf en ce qui concerne la laine de roche, vous pourrez trouver, dans le tableau ci-dessous, un certain nombre de niveaux d'émission, associés aux MTD, qui sont donnés à titre indicatif. Ces substances ne sont pas toutes utilisées dans tous les secteurs ou dans toutes les installations, certaines substances étant traitées dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs. Car elles ne sont employées que dans un secteur spécifique. Malgré ces considérations, il existe un certain nombre de points communs, en ce qui concerne les techniques qui pourraient être appliquées, dans les situations où une réduction secondaire est nécessaire :

- Chlorures (HCl) <30 mg/Nm<sup>3</sup>
- Fluorures (HF) <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Particules <20 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux (gaz + phase solide) (Groupe 1 + Groupe 2) <5 mg/Nm<sup>3</sup>



- Métaux (gaz + phase solide) (Groupe 1) <1 mg/Nm<sup>3</sup>

### Emissions aqueuses

Les émissions aqueuses, provenant des procédés de production de l'industrie du verre, sont généralement faibles et ne sont pas spécifiques à ce secteur de production. Toutefois, un certain nombre d'opérations peuvent générer des émissions "aqueuses" plus significatives. On estime que les niveaux d'émission, mentionnés ci-dessous, suffisent à protéger l'environnement aqueux et ces valeurs sont représentatives des niveaux d'émission qu'on pourrait obtenir avec les techniques généralement considérées comme des MTD. Elles ne représentent pas forcément les niveaux actuellement obtenus dans le secteur. Mais elles se fondent sur l'avis des experts du GTT, Groupe de Travail Technique.

- Solides en suspension <30 mg/l
- Quantité nécessaire d'oxygène chimique (Note 1) 100 à 130 mg/l
- Ammoniaque, Kjeldahl <10 mg/l
- Sulfate <1000 mg/l
- Fluorure 15 à 25 mg/l
- Arsenic <0,3 mg/l
- Antimoine <0,3 mg/l
- Barium <3,0 mg/l
- Cadmium <0,05 mg/l
- Chrome, Total <0,5 mg/l
- Cuivre <0,5 mg/l
- Plomb (Note 2) <0,5 mg/l
- Nickel <0,5 mg/l
- Etain (Note 3) <0,5 mg/l
- Zinc <0,5 mg/l
- Phénol <1,0 mg/l
- Acide borique 2 à 4 mg/l
- pH 6,5 à 9
- Huile minérale <20 mg/l

(Note 1) – En ce qui concerne le secteur de la production des fibres de verre à fil continu, ce chiffre devrait être de 200 mg/l. En général, la quantité nécessaire d'oxygène chimique est relativement faible et le niveau actuellement, associé aux MTD, peut dépendre de l'eau qui est destinée à recevoir les émissions. Si elle est particulièrement "sensible", des niveaux inférieurs à ce chiffre pourraient être exigés.

(Note 2) – Pour les procédés de production du verre, pour gobeletterie, dans lesquels des quantités significatives de composés du plomb sont utilisées, une valeur de 1,0 mg/l est actuellement considérée plus adéquate. Aucun obstacle technique majeur ne s'oppose à la réalisation d'une valeur de 0,5 mg/l, et compte tenu du temps nécessaire au développement et à la mise en application des techniques, ce chiffre est tout à fait envisageable.

(Note 3) – Pour les procédés de production de verre d'emballage, dans lesquels des dépoussiéreurs par voie humide sont employés, pour le traitement des émissions en aval, un niveau d'émission de <3 mg/l est plus approprié.

Dans certaines conditions, l'évacuation vers une station d'épuration ou vers une autre usine de traitement, située en dehors du site de production, peut également constituer une MTD. Lorsque cette solution est proposée, il faudra examiner de manière approfondie la capacité et l'adéquation des installations, destinées à réaliser le traitement.

## 7. Conclusions et recommandations relatives au projet

Ce chapitre divisé en trois paragraphes, les échanges d'informations, les conclusions générales et des recommandations pour la poursuite des travaux. Le premier paragraphe analyse les délais

et les mécanismes à mettre en place, pour l'échange d'information. Les industries du verre et les Etats Membres ont fourni une grande quantité d'informations d'excellente qualité. Les informations reçues ont été approfondies et validées, au cours d'une consultation. Ce document devrait être revu dans les 4 ou 5 ans à venir.

Les principales conclusions d'ordre général sont les suivantes :

- L'échange d'informations a donné des résultats extrêmement positifs et, après la deuxième réunion, les membres du groupe de travail technique ont atteint un haut niveau de consensus.
- Les différents secteurs, qui composent l'industrie du verre, sont très diversifiés, et il n'est généralement pas approprié d'indiquer une seule technique, en tant que MTD.
- D'importants progrès ont été réalisés, ces dernières années, dans ce secteur en ce qui concerne l'amélioration des performances en matière de protection environnementale. Toutefois, on s'attend encore à des développements et des améliorations supplémentaires, notamment en ce qui concerne les techniques primaires, mais également dans l'application des techniques secondaires, qui ont déjà été largement appliquées dans d'autres secteurs.

Les principales recommandations en ce qui concerne les travaux à venir sont :

- Une évaluation plus approfondie, de préférence semi-quantitative, des questions communes, relatives aux moyens, serait tout à fait souhaitable.
- Une analyse plus détaillée du coût des différentes techniques serait utile, en vue de la définition des MTD.
- Lors de la prochaine révision du document, une évaluation plus approfondie des techniques nécessaires, pour diminuer la consommation d'énergie serait utile, sur la base des informations disponibles les plus récentes.
- Lors de la prochaine révision du document, il conviendra d'analyser à nouveau les progrès réalisés, grâce aux méthodes primaires de contrôle des émissions.
- Lors de la prochaine révision du document, il conviendra de réexaminer les techniques, dont certains aspects ne sont pas confirmés à l'heure actuelle, ou qui font actuellement l'objet d'un débat, pour l'industrie du verre dans son ensemble, ou pour certaines applications en particulier. Notamment les techniques utilisées pour l'élimination du dioxyde de soufre, les fours oxycombustion et la SCR, Réduction Sélective Catalytique.

## PREFACE

### 1. Caractéristiques du présent document

Sauf précision contraire, dans le présent document, toute référence à “la Directive” indiquera la Directive du Conseil 96/61/CE, sur la prévention et le contrôle intégrés, des émissions polluantes. Ce document fait partie d'une série de documents, présentant les résultats d'un échange d'informations entre les Etats Membres de l'UE, et les industries concernées par les Meilleures Techniques Disponibles, MTD, de leur contrôle et de leurs développements possibles. \*[Elle a été publiée par la Commission Européenne selon les termes de l'Article 16, 2 de la Directive et doit donc être prise en considération, conformément aux termes de l'Annexe IV de la Directive, en vue de la détermination des “meilleures techniques disponibles”.]

\* Note : les parenthèses seront enlevées une fois que la procédure de publication par la Commission sera terminée.

### 2. Obligations légales qui découlent de la Directive sur la Prévention et le Contrôle Intégrés des Emissions Polluantes, PCIP, et définition des MTD

Afin d'aider le lecteur à comprendre le contexte juridique, dans lequel s'inscrit le présent document, nous avons abordé dans cette préface certaines, parmi les principales dispositions contenues dans la Directive PCIP, y compris la définition du terme “meilleures techniques disponibles”. Cette description est inévitablement incomplète et nous la présentons ici uniquement à titre indicatif. Elle n'a, donc, aucune valeur légale et ne modifie, ni affecte en aucune façon, les dispositions de la Directive.

L'objectif de cette Directive est de réaliser la prévention et le contrôle intégrés des émissions polluantes, générées par les activités dont la liste figure à l'Annexe I, pour atteindre un haut niveau global de protection environnementale. Les fondements juridiques de cette Directive concernent donc, la protection environnementale. Sa mise en application devrait, par conséquent, prendre en compte d'autres objectifs de la Communauté, tels que la compétitivité des industries de la Communauté contribuant au procédé de développement durable.

Plus spécialement, cette Directive prévoit la mise en place d'un système d'autorisation d'exploitation, pour certaines catégories d'installations industrielles, exigeant de la part des opérateurs et des organismes de réglementation, une analyse intégrée et globale, du potentiel de l'installation concernée, pour les émissions polluantes et la consommation d'énergie. L'objectif général de cette approche intégrée doit être l'amélioration de la gestion et le contrôle des procédés industriels, de façon à assurer un haut niveau de protection environnemental, dans son ensemble. Au centre de cette approche se situe le principe fondamental, établi par l'Article 3, soit que les opérateurs doivent adopter toutes les mesures préventives appropriées, pour combattre la pollution, notamment par l'application des meilleures techniques disponibles, leur permettant d'améliorer leurs performances, en matière de protection environnementale.

Le terme “meilleures techniques disponibles” est défini à l'Article 2 (11) de la Directive de la manière suivante : “le stade le plus efficace et le plus avancé, dans le développement des activités et des méthodes opérationnelles correspondantes, qui indique que certaines techniques sont les plus adaptées, d'un point de vue pratique, pour obtenir, en principe, une base pour l'établissement de valeur limite d'émission, en matière d'émission, spécialement conçus pour prévenir et, lorsque cela n'est pas possible, réduire de manière générale les émissions et leur impact environnemental global.” L'article 2 (11) précise ultérieurement cette définition de la manière suivante :

Le terme “techniques” inclut, à la fois, la technologie appliquée et la structure, la construction, ainsi que les modalités d'entretien, de fonctionnement et de mise hors service de l'installation.

Le terme "techniques disponibles" indique les techniques développées, à une échelle qui permet de les mettre en application, dans un secteur industriel donné, dans des conditions viables d'un point de vue technique et financier, en tenant compte des coûts et des avantages qu'elles impliquent et du fait qu'elles sont ou non utilisées ou produites, dans l'Etat Membre concerné et qu'elles sont, donc, raisonnablement accessibles ou non à l'opérateur.

Le terme "meilleures" signifie les plus efficaces, pour assurer un niveau généralement élevé de protection environnementale, dans son ensemble.

De plus, l'Annexe IV de la Directive contient une liste de considérations à prendre en compte, en général ou dans des cas spécifiques, dans la détermination des meilleures techniques disponibles,... sans oublier les coûts et les avantages prévisibles et les principes de précaution et de prévention". Parmi ces considérations figurent les informations publiées par la Commission, selon les termes de l'Article 16 (2).

Les autorités compétentes, responsables de délivrer des autorisations d'exploitation, doivent tenir compte des principes généraux, établis par l'Article 3, aux fins de la définition des conditions requises, pour l'octroi de l'autorisation d'exploitation. Parmi ces conditions doivent figurer les valeurs limite des émissions, complétées ou remplacées, selon les cas, par des paramètres ou des mesures techniques équivalents. Selon les termes de l'Article 9 (4) de la Directive, les valeurs limite fixées pour les émissions, ainsi que les paramètres ou les mesures techniques équivalents, doivent se fonder, sans préjudice de la conformité aux normes de qualité, en matière d'environnement, sur les meilleures techniques disponibles, sans toutefois prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie en particulier, mais en tenant compte des caractéristiques techniques de l'installation concernée, de sa situation géographique et des conditions environnementales locales. Dans toute circonstance, les conditions d'autorisation d'exploitation doivent comporter des dispositions relatives à la réduction de la pollution longue distance ou transfrontalière, et doivent assurer un niveau élevé de protection environnementale globale.

Les Etats Membres ont l'obligation, conformément à l'Article 11 de la Directive, de faire en sorte que les autorités compétentes suivent les développements survenus, dans les meilleures techniques disponibles, ou qu'elles en soient informées.

### **3. Objectif du présent document**

L'article 16 (2) de la Directive prévoit que la Commission doit organiser "un échange d'information entre les Etats Membres et les industries concernées, sur les Meilleures Techniques Disponibles, ainsi que leur suivi et leur développement ", en publiant par la suite, les résultats de cet échange.

L'objectif, de l'échange d'information susmentionné, est décrit à l'alinéa 25 de la Directive, établissant que "le développement et l'échange d'information, au niveau de la Communauté, concernant les meilleures techniques disponibles, aideront à corriger les déséquilibres existants au sein de la Communauté, à promouvoir la diffusion au niveau mondial des valeurs limite d'émission et des techniques utilisées, dans les pays de la Communauté, et à assister les Etats Membres dans l'application efficace de la présente Directive."

La Commission, DG Environnement, a mis en place un forum d'échange d'information, IEF, chargé de contribuer aux travaux prévus par l'Article 16 (2), ainsi qu'un certain nombre de groupes de travail techniques, sous la direction de l' IEF. L'IEF et les Groupes de Travail Techniques sont composés de représentants des Etats Membres et du secteur concerné, conformément aux dispositions de l'Article 16 (2).

Le but de cette série de documents est de refléter, de manière précise, l'échange d'information qui a eu lieu, selon les termes de l'Article 16 (2), et de fournir aux autorités compétentes, en matière d'autorisation d'exploitation, des données de référence, à prendre en considération, aux

fins de la définition des conditions requises pour l'obtention de l'autorisation d'exploitation. Ces documents, grâce aux informations utiles qu'ils contiennent, sur les Meilleures Techniques Disponibles, devraient constituer des outils de travail précieux, destinés à orienter les performances en matière environnementale.

#### **4. Sources d' Information**

Ce document représente une synthèse des données collectées, auprès de nombreuses sources, y compris en particulier l'expertise de groupes nommés pour assister la Commission dans sa tâche, et vérifiées par les services de la Commission. Nous tenons à remercier ici toutes les personnes qui nous ont fourni des informations.

#### **5. Compréhension et utilisation du document**

Les informations fournies, dans le présent document, doivent être utilisées comme base pour la définition des MTD, dans des cas spécifiques. Il conviendra toujours de tenir compte, dans la détermination des MTD, et dans l'établissement des conditions d'autorisation d'exploitation, basées sur les MTD, de l'objectif global fixé, à savoir l'obtention d'un niveau élevé de protection environnementale globale.

Le reste du paragraphe décrit le type d'informations fournies, dans chacun des paragraphes qui composent le document.

Les chapitres 1 et 2 fournissent des informations générales, sur le secteur industriel concerné, et sur les procédés utilisés, dans ledit secteur. Le chapitre 3 fournit des données et des informations sur les niveaux actuels d'émission et de consommations, en décrivant la situation dans les installations déjà existantes, au moment de la rédaction du présent document.

Le chapitre 4 décrit de façon plus détaillée les techniques de réduction des émissions et les autres techniques, considérées comme les plus efficaces, aux fins de la définition des MTD et des conditions d'autorisation d'exploitation, basées sur les MTD. Parmi ces informations figurent les niveaux de consommation et d'émission, qui semblent pouvoir être réalisés, par l'utilisation de la technique concernée, une idée des coûts de mise en application et des interactions avec d'autres équipements, liés à cette technique, ainsi que la définition des limites d'application de la technique en question, aux installations nécessitant des autorisation d'exploitation PCIP, par exemple les nouvelles installations ou celles déjà existantes, de grandes ou de petites dimensions. Les techniques généralement considérées comme obsolètes ne sont pas prises en considération.

Le chapitre 5 présente les techniques, ainsi que les niveaux d'émission et de consommation qu'on considère compatibles avec les MTD, au sens large. Le but de ce chapitre est de fournir des indications d'ordre général, concernant les niveaux d'émission et de consommation, pouvant être considérés comme des points de repère appropriés, aux fins de la détermination des conditions d'autorisation d'exploitation, basées sur les MTD ou de l'établissement de règles générales, dans le cadre de l'Article 9 (8). Il faut souligner, toutefois, que le présent document ne fixe aucune valeur limite. La définition, de conditions d'autorisation d'exploitation adaptées, implique la prise en compte de facteurs locaux, spécifiques à chaque site de production, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, sa situation géographique et les conditions environnementales locales. Dans le cas des installations déjà existantes, la viabilité technique et économique de leur amélioration doit également être prise en considération. Même l'objectif unique d'assurer un niveau élevé de protection environnementale globale, implique parfois la nécessité d'analyser le pour et le contre des différents types d'impact, sur l'environnement et ce type de jugement sera souvent influencé par des considérations locales. Bien qu'on ait essayé de traiter quelques-unes de ces questions, il n'a pas été possible de les analyser toutes, dans ce document. Les techniques et les niveaux, présentés au chapitre 5, ne seront, donc pas adaptés à tous les types d'installations. D'autre part, l'obligation d'assurer un niveau élevé de protection environnementale, y compris la réduction de la pollution longue distance ou transfrontalière, oblige à ne pas fonder la définition des conditions requise pour

l'autorisation d'exploitation, sur des critères purement locaux. Il est donc extrêmement important que les informations, contenues dans le présent document, soient entièrement prises en considération par les autorités compétentes, en matière d'autorisation d'exploitation.

Les meilleures techniques disponibles évoluant sans arrêt, ce document sera revu et mis à jour en conséquence. Toute remarque ou suggestion devra être adressée au Bureau Européen de l'IPPC, auprès de l'Institut d'Etudes Technologiques Prospectives, à l'adresse suivante :

World Trade Center, Isla de la Cartuja s/n, E-41092 Séville, Espagne

Téléphone : +34 95 4488 284

Fax : +34 95 4488 426

e-mail : [eippcb@jrc.es](mailto:eippcb@jrc.es)

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



---

## Document de Référence sur les Meilleures Techniques Disponibles dans l'Industrie du Verre

**RECAPITULATIF**..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

**PREFACE**..... **1-23**

**1 GENERALITES**..... **1**

1.1	Objet du Document	1
1.2	Introduction	2
1.2.1	Caractéristiques du verre	4
1.2.2	Classification générique des types de verre	5
1.2.3	Origines historiques	7
1.3	Verre d'emballage	8
1.3.1	Généralités du secteur	8
1.3.2	Produits et Marchés	9
1.3.3	Aspects commerciaux et financiers	10
1.3.4	Principaux problèmes liés à l'environnement	11
1.4	Verre plat	12
1.4.1	Généralités du secteur	12
1.4.2	Produits et marchés	13
1.4.3	Aspects commerciaux et financiers	14
1.4.4	Principaux problèmes environnementaux	15
1.5	Fibres de verre à fil continu	16
1.5.1	Généralités du secteur	16
1.5.2	Produits et marchés	17
1.5.3	Aspects commerciaux et financiers	17
1.5.4	Principaux problèmes liés à l'environnement	18
1.6	Verre pour gobeletterie	18
1.6.1	Généralités du secteur	18
1.6.2	Produits et Marchés	19
1.6.3	Aspects commerciaux et financiers	20
1.6.4	Principaux problèmes environnementaux	21
1.7	Verres spéciaux	22
1.7.1	Généralités du secteur	22
1.7.2	Produits et Marchés	22
1.7.3	Aspects commerciaux et financiers	24
1.7.4	Principaux problèmes environnementaux	25
1.8	Laine minérale	26
1.8.1	Généralités du secteur	26
1.8.2	Produits et Marchés	27
1.8.3	Aspects commerciaux et financiers	28
1.8.4	Principaux problèmes environnementaux	28
1.9	Fibres céramiques	29
1.9.1	Généralités du secteur	29
1.9.2	Produits et Marchés	30
1.9.3	Considérations d'ordre commercial	30
1.9.4	Principaux problèmes environnementaux	31
1.10	Frittes	31
1.10.1	Généralités du secteur	31
1.10.2	Produits et Marchés	32
1.10.3	Considérations d'ordre commercial	32
1.10.4	Principaux problèmes environnementaux	33

**2 PROCÉDES ET TECHNIQUES APPLIQUES**..... **35**

2.1	Manipulation des matières premières	35
2.2	La fusion du verre	36
2.2.1	Matières premières utilisées dans la fabrication du verre	36
2.2.2	Le procédé de fusion	38
2.3	Techniques de Fusion	40
2.3.1	Fours régénératifs	42

2.3.2	Fours à récupération.....	44
2.3.3	La Fusion à l'oxygène.....	45
2.3.4	Fusion Electrique .....	45
2.3.5	Fusion combinée au combustible fossile et à l'électricité .....	46
2.3.6	Fusion en discontinu .....	47
2.3.7	Fondoirs à verre spéciaux .....	47
2.4	Verre d'emballage .....	48
2.5	Verre plat .....	52
2.5.1	Le procédé de bain de float du verre.....	52
2.5.2	Le procédé de production du verre coulé, verre imprimé et verre armé .....	54
2.6	Fibres de verre à fil continu .....	55
2.7	Gobeletterie .....	57
2.8	Verres spéciaux .....	60
2.9	Laine minérale .....	64
2.9.1	Laine de verre .....	64
2.9.2	Laine de roche.....	66
2.10	Fibres céramiques .....	68
2.11	Frittes .....	69
<b>3</b>	<b>NIVEAUX REELS DE CONSOMMATION ET D'EMISSION.....</b>	<b>73</b>
3.1	Introduction .....	73
3.2	Vue d'ensemble de l'Industrie du Verre .....	74
3.2.1	Apports utilisés dans le procédé.....	74
3.2.2	Produits du procédé de fabrication.....	77
3.2.2.1	Emissions atmosphériques.....	77
3.2.2.2	Emissions aqueuses .....	80
3.2.2.3	Autres types d'émission .....	80
3.2.3	Energie .....	81
3.3	Verre d'emballage .....	86
3.3.1	Apports utilisés dans le procédé.....	87
3.3.2	Emissions atmosphériques .....	88
3.3.2.1	Matières premières .....	88
3.3.2.2	Fusion .....	88
3.3.2.3	Activités en aval .....	91
3.3.3	Emissions aqueuses.....	91
3.3.4	Autres déchets.....	92
3.3.5	Energie .....	92
3.4	Verre plat .....	93
3.4.1	Apports utilisés dans le procédé.....	93
3.4.2	Emissions atmosphériques .....	95
3.4.2.1	Matières premières .....	95
3.4.2.2	Fusion .....	95
3.4.2.3	Activités en aval .....	96
3.4.3	Emissions aqueuses.....	97
3.4.4	Autres déchets.....	97
3.4.5	Energie .....	97
3.5	Fibres de verre à fil continu .....	98
3.5.1	Apports utilisés dans le procédé.....	99
3.5.2	Emissions atmosphériques .....	101
3.5.2.1	Matières premières .....	101
3.5.2.2	Fusion .....	101
3.5.2.3	Activités en aval .....	102
3.5.3	Emissions aqueuses.....	102
3.5.4	Autres déchets.....	103
3.5.5	Energie .....	104
3.6	Gobeletterie .....	105
3.6.1	Apports utilisés dans le procédé.....	106
3.6.2	Emissions atmosphériques .....	107
3.6.2.1	Matières premières .....	108
3.6.2.2	Fusion .....	108
3.6.2.3	Activités en aval .....	109
3.6.3	Emissions aqueuses.....	109

3.6.4	Autres déchets .....	110
3.6.5	Energie .....	110
3.7	Verres spéciaux .....	111
3.7.1	Apports utilisés dans le procédé .....	111
3.7.2	Emissions atmosphériques .....	113
3.7.2.1	Matières premières .....	113
3.7.2.2	Fusion.....	113
3.7.2.3	Activités en aval.....	114
3.7.3	Emissions aqueuses .....	115
3.7.4	Autres déchets .....	115
3.7.5	Energie .....	115
3.8	Laine minérale .....	116
3.8.1	Apports utilisés dans le procédé .....	116
3.8.2	Emissions atmosphériques .....	118
3.8.2.1	Matières premières .....	118
3.8.2.2	Fusion.....	119
3.8.2.3	Emissions générées par des opérations autres que la fusion .....	120
3.8.3	Emissions aqueuses .....	122
3.8.4	Autres déchets .....	122
3.8.5	Energie .....	123
3.9	Fibres céramiques .....	124
3.9.1	Apports utilisés dans le procédé .....	124
3.9.2	Emissions atmosphériques .....	125
3.9.2.1	Matières premières .....	125
3.9.2.2	Fusion.....	125
3.9.2.3	Activités en aval.....	125
3.9.3	Emissions aqueuses .....	126
3.9.4	Autres déchets .....	126
3.9.5	Energie .....	126
3.10	Frittes .....	127
3.10.1	Apports utilisés dans le procédé .....	127
3.10.2	Emissions atmosphériques .....	128
3.10.2.1	Matières premières.....	128
3.10.2.2	Fusion.....	128
3.10.2.3	Activités en aval .....	128
3.10.3	Emissions aqueuses .....	128
3.10.4	Autres déchets .....	129
3.10.5	Energie .....	129
<b>4</b>	<b>TECHNIQUES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA DEFINITION DES MTD.....</b>	<b>131</b>
4.1	Introduction .....	131
4.2	Choix des techniques de fusion .....	133
4.2.1	Fusion électrique .....	135
4.3	Techniques de manutention des matières premières .....	139
4.4	Techniques de contrôle des émissions atmosphériques générées par la fusion .....	141
4.4.1	Particules .....	141
4.4.1.1	Techniques Primaires.....	143
4.4.1.2	Précipitateurs électrostatiques .....	148
4.4.1.3	Filtres à manches.....	152
4.4.1.4	Collecteurs mécaniques.....	155
4.4.1.5	Dispositifs de filtrage haute température .....	156
4.4.1.6	Dépoussiéreurs par voie humide .....	157
4.4.1.7	Récapitulatif de l'analyse des techniques indiquées au Paragraphe 4.4.1 .....	157
4.4.2	Oxydes d'azote NOx.....	159
4.4.2.1	Modification de la Combustion.....	160
4.4.2.2	Composition.....	164
4.4.2.3	Fours spéciaux .....	165
4.4.2.4	Le procédé FENIX.....	167
4.4.2.5	Fusion à l'oxygène .....	169
4.4.2.6	Réduction chimique par le combustible ,CRF, .....	178
4.4.2.7	Réduction catalytique sélective , SCR .....	184
4.4.2.8	Réduction non catalytique sélective, SNCR .....	189

4.4.2.9 Comparaison des coûts des techniques de réduction des NOx .....	192
4.4.3 Oxydes de soufre, SOx .....	195
4.4.3.1 Sélection du combustible.....	195
4.4.3.2 Formule de la composition .....	197
4.4.3.3 Epuration par voie sèche ou semi-sèche .....	198
4.4.4 Fluorures, HF et chlorures HCl.....	206
4.4.4.1 Réduction à la source.....	206
4.4.4.2 Techniques d'épuration .....	208
4.4.5 Oxydes de carbone.....	208
4.5 Techniques de lutte contre les émissions atmosphériques rejetées par les activités autres que la fusion 209	
4.5.1 Verre d'emballage.....	209
4.5.2 Verre plat .....	210
4.5.3 Fil de silionne.....	211
4.5.4 Gobeleterie.....	212
4.5.5 Verres spéciaux .....	212
4.5.6 Laine minérale.....	213
4.5.6.1 Zone de formage.....	213
4.5.6.2 Four pour traitement thermique .....	224
4.5.6.3 Refroidissement des produits.....	228
4.5.6.4 Usinage et conditionnement des produits .....	229
4.5.6.5 Odeurs provenant de la production de laine minérale .....	229
4.5.7 Fibre céramique.....	233
4.5.8 Fritte.....	234
4.6 Techniques de lutte contre les émissions aqueuses .....	234
4.7 Techniques de réduction d'autres déchets .....	237
4.8 Energie .....	239
4.8.1 Technique de fusion et conception du four .....	240
4.8.2 Régulation de la combustion et choix du combustible .....	242
4.8.3 Utilisation du calcin.....	242
4.8.4 Chaudière de récupération .....	244
4.8.5 Préchauffage de la composition et du calcin.....	245
<b>5 CONCLUSIONS SUR LA QUESTION DES MTD .....</b>	<b>248</b>
5.1 Introduction .....	248
5.2 Généralités .....	249
5.2.1 Stockage et manutention des matières .....	251
5.2.2 Particules .....	251
5.2.3 Oxydes de soufre.....	252
5.2.4 Autres substances.....	253
5.3 Verre d'emballage .....	253
5.3.1 Poussières.....	253
5.3.2 Oxydes d'azote.....	253
5.3.3 Oxydes de soufre.....	254
5.3.4 Autres émissions issues de la fusion .....	255
5.3.5 Procédés situés en aval.....	255
5.4 Verre plat .....	255
5.4.1 Poussières.....	255
5.4.2 Oxydes d'azote.....	255
5.4.3 Oxydes de soufre.....	256
5.4.4 Autres émissions issues de la fusion .....	256
5.4.5 Procédés situés en aval.....	257
5.5 Fil de silionne .....	257
5.5.1 Poussières.....	257
5.5.2 Oxydes d'azote.....	258
5.5.3 Oxydes de soufre.....	258
5.5.4 Autres émissions issues de la fusion .....	259
5.5.5 Procédés en aval.....	259
5.6 Gobeleterie .....	259

5.6.1	Poussières .....	259
5.6.2	Oxydes d'azote .....	259
5.6.3	Oxydes de soufre .....	261
5.6.4	Autres émissions issues de la fusion.....	261
5.6.5	Procédés en aval .....	262
5.7	Verres spéciaux .....	262
5.7.1	Poussières .....	262
5.7.2	Oxydes d'azote .....	262
5.7.3	Oxydes de soufre .....	263
5.7.4	Autres émissions issues de la fusion.....	263
5.7.5	Procédés en aval .....	263
5.8	Laine minérale .....	264
5.8.1	Poussières .....	264
5.8.2	Oxydes d'azote .....	264
5.8.3	Oxydes de soufre .....	265
5.8.4	Autres émissions issues de la fusion.....	266
5.8.5	Procédés en aval .....	266
5.9	Fibre céramique .....	267
5.9.1	Fusion.....	267
5.9.2	Procédés en aval .....	268
5.10	Fritte .....	268
5.10.1	Poussières .....	268
5.10.2	Oxydes d'azote .....	268
5.10.3	Oxydes de soufre .....	269
5.10.4	Autres émissions issues de la fusion.....	269
5.10.5	Procédés en aval .....	269
5.11	Emissions aqueuses	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.12	Autres déchets .....	270
<b>6</b>	<b>LES NOUVELLES TECHNIQUES .....</b>	<b>273</b>
6.1	Brûleur à faible émission de NOx .....	273
6.2	Fusion à l'oxygène .....	274
6.3	Préchauffage du calcin et de la composition .....	274
6.4	Formulation des compositions .....	274
6.5	Intégration des procédés de fabrication de fritte .....	275
6.6	Recirculation des gaz de fumée .....	275
6.7	Programme de recherche Glasulin .....	275
6.8	Nouveaux modèles de fondoir à verre .....	276
6.8.1	Le fondoir à verre Seg .....	276
6.8.2	Fondoir à verre de conception avancée .....	276
6.8.3	Le fondoir à verre au plasma .....	277
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>278</b>
7.1	Echange d'information .....	278
7.2	Conclusions générales .....	278
7.3	Recommandations pour la poursuite de l'étude .....	279
<b>8</b>	<b>ANNEXE I : EXEMPLE DE VALEURS D'EMISSION.....</b>	<b>283</b>
8.1	Verre d'emballage .....	283
8.2	Verre plat .....	284
8.3	Fil de silionne .....	286
8.4	Gobeletterie .....	288
8.5	Verres spéciaux .....	289
8.6	Laine minérale .....	291
<b>9</b>	<b>ANNEXE II : EXEMPLE DE BILANS SOUFRE DANS LES FOURS INDUSTRIELS.....</b>	<b>295</b>

---

<b>10</b>	<b>ANNEXE III : CONTROLE DES EMISSIONS.....</b>	<b>299</b>
	10.1 Principaux polluants	299
	10.2 Contrôle des émissions	300
<b>11</b>	<b>ANNEXE IV : LEGISLATION NATIONALE.....</b>	<b>307</b>
	<b>LEXIQUE.....</b>	<b>323</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>326</b>



## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Répartition approximative de la production de verre par secteur .....	3
Tableau 1.2 : Principaux producteurs de verre d'emballage dans l'UE (1997) .....	8
Tableau 1.3 : Distribution des installations de production de verre d'emballage dans les états membres.....	9
Tableau 1.4 : Nombre d'installations de production de verre d'emballage, en fonction du volume de production .....	9
Tableau 1.5 : Localisation des bains métalliques dans l'UE en 1997 .....	12
Tableau 1.6 : Nombre de bains métalliques dans les Etats Membres en 1997 .....	13
Tableau 1.7 : Pourcentage de capacité dans le secteur du verre float dans les catégories indiquées.....	13
Tableau 1.8 : Nombre d'installations pour la production de fibres de verre à fil continu et de fours dans les Etats Membres.....	16
Tableau 1.9 : Nombre de fours pour la production de fibres de verre, à fil continu dans les catégories de volume de production indiquées.....	17
Tableau 1.10 : Nombre et répartition des installations de production de verre pour gobeletterie dans les Etats Membres en 1997 .....	19
Tableau 1.11 : Nombre d'installations de production de verre pour gobeletterie dans les différentes catégories de volume de production (estimation).....	19
Tableau 1.12 : Répartition du secteur des verres spéciaux .....	23
Tableau 1.13 : Répartition de la production de verres spéciaux dans l'UE .....	24
Tableau 1.14 : Investissements nécessaires pour les installations destinées à la production de verres spéciaux.....	25
Tableau 1.15 : Nombre d'usines de production de laine minérale dans les Etats Membres .....	26
Tableau 1.16 : Nombre d'installations de production de laine minérale dans les différentes catégories de volume de production .....	27
Tableau 1.17 : Répartition des usines de production de fibres céramiques parmi les Etats Membres .....	30
Tableau 1.18 : Répartition des usines de production de frittes dans les Etats Membres (estimation) .....	31
Tableau 1.19 : Nombre d'installations de production des frittes par catégorie de volume de production (estimation) .....	32
Tableau 2.1 : Matières premières de base employées dans la fabrication du verre .....	36
Tableau 2.2 : Agents utilisés pour la coloration .....	37
Tableau 2.3 : Estimation des types de fours présents dans l'UE, en 1997 [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE] .....	41
Tableau 2.4 : Composition habituelle du verre d'emballage .....	48
Tableau 2.5 : Composition habituelle du verre plat.....	52
Tableau 2.6 : Composition habituelle du verre E.....	56
Tableau 2.7: Composition chimique des principaux produits du secteur des verres spéciaux .....	63
Tableau 2.8 : Composition habituelle de la laine minérale .....	64
Tableau 2.9 : Composition chimique habituelle de fibres céramiques réfractaires en pourcentage du poids .....	69
Tableau 3.1 : Principales matières premières employées dans la fabrication du verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE].....	76
Tableau 3.2 : Récapitulatif des émissions atmosphériques des opérations de fusion .....	79
Tableau 3.3 : Emissions de métaux lourds potentiellement générées par la production du verre .....	80
Tableau 3.4 : Energie théoriquement nécessaire pour la fusion des types de verre les plus courants .....	82
Tableau 3.5 : Exemples de consommation d'énergie, pour une série d'installations de production de verre .....	85
Tableau 3.6 : Apports et produits de la fabrication du verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE] .....	87
Tableau 3.7 : Matières premières et matériaux utilisés dans le secteur du verre d'emballage, COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE Janvier 98,.....	87
Tableau 3.8 : Emissions totales, constatées pour l'ensemble des fours de production de verre d'emballage, avec mesures de réduction primaire et secondaire. ....	90
Tableau 3.9 : Moyenne de 80% des émissions des fours du secteur de production du verre d'emballage avec mesures de réduction primaire ou secondaire .....	91
Tableau 3.10 : Matières premières utilisées dans le secteur du verre plat.....	94
Tableau 3.11 : Niveaux d'émission concernant les fours avec et sans systèmes de réduction, pour la production de verre plat.....	96
Tableau 3.12 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production dans le secteur des fibres de verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE] .....	99

Tableau 3.13 : Matières premières et substances utilisées dans la production de fibres de verre à fil continu .....	100
Tableau 3.14 : Niveaux d'émissions relatives aux installations de production des fibres de verre à fil continu .....	102
Tableau 3.15 : Vue d'ensemble des apports et des produits du secteur de production de la gobeletterie ..	106
Tableau 3.16 : Matières premières employées dans la fabrication de la gobeletterie .....	107
Tableau 3.17 : Synthèse des émissions atmosphériques générées par les différents types de fondoirs à verre .....	108
Tableau 3.18 : Matières premières utilisées dans le secteur des verres spéciaux.....	112
Tableau 3.19 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour un procédé typique de fabrication de silicate de sodium [tm28 EMPA].....	112
Tableau 3.20 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour une installation moyenne de production de verre pour tubes cathodiques .....	113
Tableau 3.21 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour une installation de production de verre pour écrans de téléviseurs, équipée de système de réduction du Nox SCR .....	113
Tableau 3.22 : Matières premières utilisées dans le secteur de production de la laine minérale .....	117
Tableau 3.23 : Volume des émissions gazeuses pour la fabrication de laine minérale .....	118
Tableau 3.24 : Valeurs complètes des émissions pour les opérations de fusion de laine minérale.....	120
Tableau 3.25 : Moyenne de 80 % des émissions produites par la fabrication de laine minérale .....	120
Tableau 3.26 : Valeurs complètes des émissions des chaînes de production de laine minérale mg/m <sup>3</sup> ....	121
Tableau 3.27 : Moyenne de 80 % de l'échelle de valeurs des émissions générées par les chaînes de production de laine minérale.....	122
Tableau 3.28 : Génération et élimination des déchets solides dans le secteur de la laine minérale .....	123
Tableau 3.29 : Consommation d'énergie dans la production de fibres de verre.....	124
Tableau 3.30 : Matières premières utilisées dans le secteur des fibres céramiques .....	124
Tableau 3.31 : Principales matières premières utilisées dans la production de frites .....	127
Tableau 3.32 : Niveaux d'émission des fours à frites .....	128
Tableau 4.1 : Principaux avantages et inconvénients de la fusion électrique .....	139
Tableau 4.2 : Principaux avantages et inconvénients des techniques primaires, pour la réduction des poussières.....	148
Tableau 4.3 : Coût des précipitateurs électrostatiques, avec polissage des gaz acides [tm32 Beerkens] ..	150
Tableau 4.4 : Principaux avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques.....	152
Tableau 4.5 : Principaux avantages et inconvénients des filtres à manches .....	155
Tableau 4.6 : Principaux avantages et inconvénients des cyclones .....	156
Tableau 4.7 : Principaux avantages et inconvénients de la modification de la combustion .....	164
Tableau 4.8 : Principaux avantages et inconvénients de la fusion à l'oxygène .....	177
Tableau 4.9 : Principaux avantages et inconvénients du procédé 3R .....	180
Tableau 4.10 : Coûts de la SCR avec précipitateurs électrostatiques et lavage des gaz acides .....	187
Tableau 4.11 : Principaux avantages et inconvénients de la SCR .....	188
Tableau 4.12 : Coûts de la SNCR .....	190
Tableau 4.13 : Principaux avantages et inconvénients de la SNCR.....	191
Tableau 4.14 : Coûts d'investissement pour les techniques de réduction .....	193
Tableau 4.15 : Coûts d'exploitation annuelle pour les techniques de réduction.....	194
Tableau 4.16 : Coûts spécifiques des techniques de réduction en euros/tonne de verre .....	194
Tableau 4.17 : Coûts de la fusion à l'oxygène, euros/tonne de verre, pour deux prix d'oxygène .....	195
Tableau 4.18 : Emissions indicatives de SOx dans les déchets gazeux de verrerie pour différents combustibles .....	196
Tableau 4.19 : Variations des prix de l'énergie dans l'Union européenne – source COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE.....	196
Tableau 4.20 : Pouvoirs d'absorption à sec pour le Ca(OH) <sub>2</sub> (chiffres indicatifs).....	199
Tableau 4.21 : Taux de réduction des Sox, pour l'épuration par voie sèche avec du Ca(OH) <sub>2</sub> .....	200
Tableau 4.22 : Taux de réduction des SOx pour l'épuration par voie sèche avec du Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	200
Tableau 4.23 : Taux de réduction des SOx pour une épuration par voie semi-sèche avec une solution de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	200
Tableau 4.24 : Taux de réduction des SOx pour l'épuration par voie demi-sèche avec du Ca(OH) <sub>2</sub> .....	201
Tableau 4.25 : Principaux avantages et inconvénients de l'épuration par voie sèche ou semi-sèche .....	205
Tableau 4.26 : Principaux avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques humides .....	222
Tableau 4.27 : Principaux avantages et inconvénients des filtres en laine de roche .....	224
Tableau 4.28 : Principaux avantages et inconvénients de l'incinération.....	228

---

Tableau 4.29 : Valeurs générales pouvant être obtenues pour l'émission atmosphérique générée par la chaîne de fabrication (mg/Nm <sup>3</sup> ) .....	231
Tableau 4.30 : Coûts d'investissement et d'exploitation des techniques de réduction des polluants .....	233
Tableau 4.31 : Liste des techniques possibles de traitement des eaux usées, employées dans l'industrie du verre.....	237
Tableau 5.1 : Facteurs indicatifs de conversion des mg/m <sup>3</sup> en kg/tonne de verre fondu <sup>(1)</sup> .....	251
Tableau 5.2 : Classifications des métaux et de leurs composés.....	253
Tableau 10.1 : Principaux polluants que l'on doit mesurer en verrerie .....	300
Tableau 10.2 : Techniques de surveillance continue.....	303
Tableau 10.3 : Débits massiques pour la surveillance continue (France et Allemagne).....	303
Tableau 10.4 : Techniques de surveillance discontinue.....	305

---

## Liste des chiffres

Schéma 1.1 : Production totale de verre entre 1986 et 1996 (*sauf frites et fibres céramiques) ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.1 : Fours régénératifs à brûleurs transversaux .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.2 : Section transversale d'un four à régénération.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.3 : Four à boucle à régénération à un seul passage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.4 : Plan d'un four à boucle à régénération .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.5 : Formage par pression et soufflage et par soufflage-soufflage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.6 : Procédé de production du verre float .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.7 : Procédé de production du verre coulé .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.8 : Le procédé de moulage des objets en verre.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.9 : Le procédé de filature des objets en verre.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.10 : Exemple d'usine de production du verre .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.11 : Exemple de circuit hydrique pour la production de laine minérale.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 2.12 : Exemple d'usine de production de laine de roche .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 3.1 : Utilisation d'énergie dans une usine de production de verre d'emballage	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 3.2 : Utilisation d'énergie dans un procédé de production de verre float .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 3.3 : Utilisation d'énergie dans un procédé de production de fibres de verre à fil continu.	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 3.4 : Utilisation d'énergie dans la fabrication de verre au plomb (four à pots)	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Schéma 4.1 : Vue d'ensemble du procédé de recalcination .....	182

# 1 GENERALITES

## 1.1 Objet du Document

Le présent document traite des activités industrielles spécifiées aux Paragraphes 3.3 et 3.4 de l'Annexe 1 de la Directive 96/61/EC :

3.3 Les installations pour la fabrication du verre et de fibres de verre, dotées d'une capacité de fusion supérieure à 20 tonnes par jour.

3.4 Les installations pour la fusion de substances minérales, y compris la production de fibres minérales, dotées d'une capacité de fusion supérieure à 20 tonnes par jour.

Les types d'activités qui rentrent dans ces catégories, varient beaucoup en volume, techniques employées, et par conséquent on utilise aussi différentes techniques de protection environnementale. Afin de déterminer si une installation rentre dans les définitions données à l'Annexe 1, on évalue la capacité de chaque opération de fusion, effectuée dans l'installation. Dans le cadre du présent document, le critère de 20 tonnes par jour de capacité de fusion, a été adopté en rapport, avec la masse de verre fondu produite. Cette approche n'entend pas préjuger de l'interprétation de la définition donnée dans la Directive, mais plutôt assurer que les informations fournies sont cohérentes, par rapport à la terminologie standard, utilisée dans l'industrie du verre.

Aux fins du présent document, les activités industrielles qui rentrent dans le cadre des définitions figurent aux Paragraphes 3.3 et 3.4, de l'Annexe 1 de la Directive 96/61/EC et seront citées sous le terme de "l'industrie du verre", comprenant, en principe, huit secteurs différents. Cette répartition a été effectuée sur la base des produits fabriqués, bien que parfois certaines activités puissent se recouper. Les huit secteurs en question sont les :

1. Verre d'emballage
2. Verre plat
3. Fibres de verre à fil continu
4. Verre pour gobeletterie
5. Verres spéciaux, y compris le silicate de sodium
6. Laine minérale, comprenant deux sous-secteurs, la laine de verre et la laine de roche
7. Fibres céramiques
8. Frittes

Ce document traite, non seulement des activités de production de base, mais aussi des activités directement associées à celles-ci, pouvant affecter les émissions et la pollution en général. Par conséquent, le présent document couvre toutes les activités, de la réception des matières premières, à la production de produits intermédiaires, jusqu'à la livraison du produit fini. Certaines activités ne sont pas prises en considération, car on estime qu'elles ne sont pas directement liées à l'activité principale. Par exemple, la transformation du verre plat en d'autres produits, les doubles vitrages ou les produits destinés à l'automobile, n'est pas traitée dans ce document. Une fois encore, cette approche n'entend pas préjuger de l'interprétation de la Directive par les Etats Membres. Les activités traitées sont :

- La manutention et le stockage des matières premières.
- Le mélange et le transfert.
- La fusion et la finition.
- Le formage, les bains de float, le verre coulé, le moulage, le soufflage, la fabrication de fibres, la trempe des frittes.
- Le conditionnement, recuisson en gaine, revenu.
- Revêtement, y compris l'application de produits agglomérants et lubrifiants.
- Les traitements de surface, polissage à l'acide.
- Le traitement thermique et le séchage
- Le fraisage.

- L'usinage, la découpe et l'emballage.
- Le stockage, la manutention et la transformation des déchets.
- 

## 1.2 Introduction

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques EURIMA ]

L'industrie du verre, au sein de l'Union Européenne, est extrêmement diversifiée, aussi bien en termes de gamme de produits, que de techniques de fabrication. La gamme de produits comprend des articles aussi différents que des verres en cristal au plomb décorés, et de gros volumes de verre float, produits pour le bâtiment et l'industrie automobile. Les techniques de fabrication peuvent aller des petits fours électriques, utilisés dans le secteur des fibres céramiques, aux fours à boucle régénératifs, employés dans le secteur du verre plat, capables de produire jusqu'à 700 tonnes par jour. L'industrie du verre, au sens large, peut inclure également de petites installations, ayant une capacité inférieure à 20 tonnes par jour. Toutefois, en ce qui concerne certaines données statistiques, fournies dans le présent chapitre, nous n'avons pu distinguer la part des petites installations. Mais cela ne constitue pas un problème, car elles représentent moins de 5 % de la production totale, du secteur de la fabrication du verre.

L'industrie du verre produit essentiellement des biens de consommation. Bien qu'on ait pu développer de nombreuses méthodes pour ajouter de la valeur aux produits à haut volume de production, afin de garantir la compétitivité du secteur. Plus de 80 % de la production de l'industrie du verre est destinée à d'autres secteurs de production et l'industrie du verre, dans son ensemble, dépend en grande partie du bâtiment et de l'industrie agroalimentaire. Toutefois, cela ne vaut pas pour tous les secteurs qui la composent. Car parmi les secteurs dotés d'un volume de production moins élevé, certains produisent des articles techniques ou de consommation à haute valeur ajoutée.

A la fin des années 90, l'industrie du verre est en pleine restructuration. Afin de réduire leurs coûts et de rester compétitives, sur un marché global, tout en bénéficiant d'économies d'échelle, les entreprises fusionnent et le nombre d'opérateurs indépendants diminue de façon constante. Les principaux groupes de ce secteur s'internationalisent et les utilisateurs demandent une qualité de plus en plus homogène, quel que soit le pays auquel les produits sont destinés. L'industrie du verre dans l'UE est à l'avant-garde du développement technologique et, en tant que telle, elle pourra améliorer ses performances industrielles, dans les années à venir.

A l'exception de taille de Saint-Gobain, peu de sociétés importantes sont présentes dans plus de deux secteurs, parmi les huit mentionnés plus haut. Par exemple, la société Owens Corning est spécialisée dans la technologie de production des fibres de verre à fil continu, et dans la laine de verre. PPG est un grand fabricant international de verre plat et de fibres de verre à fil continu, tandis que le Groupe Pilkington est essentiellement spécialisé dans la production de verre plat.

Les principaux défis que l'industrie du verre est appelée à affronter dans le domaine environnemental sont les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie. La fabrication du verre est une activité à haute température et à forte consommation d'énergie, qui provoque l'émission du produit de la combustion et à l'oxydation à haute température d'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, provenant principalement de la volatilisation et de la condensation ultérieure des produits volatils, qui font partie de la composition. On estime les émissions atmosphériques, produites par l'industrie du verre, en 1997, à 9 000 tonnes de poussières, 103 500 tonnes de NOx, 91500 tonnes de Sox et 22 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, incluant la génération d'électricité. Cela représente environ 0,7 % des émissions totales de l'UE. La consommation totale d'énergie, de l'industrie du verre, était d'environ 265 PJ.



Les émissions aqueuses sont relativement faibles et l'industrie du verre ne doit pas affronter de problèmes majeurs dans ce secteur. Toutefois, certains secteurs sont confrontés à des problèmes d'émissions aqueuses, qui seront traités dans les paragraphes de ce document, spécifiquement consacrés aux différents secteurs. Généralement, le niveau des déchets solides est aussi relativement faible et de nombreuses initiatives ont été mises en place, pour réduire la production de déchets solides et pour le recyclage des déchets internes et des déchets post consommation.

Généralement, les matières premières, pour la fabrication du verre, sont facilement disponibles. Et il s'agit de substances naturelles ou artificielles relativement peu nocives. La fourniture de ces matières premières ne provoque pas d'importants problèmes environnementaux et le niveau des déchets est généralement très faible.

La plupart, des secteurs appartenant à l'industrie du verre, utilisent de grands fours en continu, avec une durée de vie pouvant atteindre douze ans. Ce type de fours représente un investissement initial non négligeable, tandis que le fonctionnement en continu et la rénovation périodique des fours, représentent un investissement normal, au cours de la fabrication. Lorsqu'on doit apporter des modifications significatives à la technologie de fusion, il est conseillé, dans une optique d'économie, de les effectuer au cours de la réfection des fours. Ceci vaut également pour les mesures secondaires de réduction les plus complexes, qui doivent être correctement dimensionnées, ainsi que pour la mise en place du conditionnement du gaz, si nécessaire. Toutefois il est possible d'apporter un certain nombre d'améliorations au fonctionnement des fours, y compris en installant des techniques secondaires, pendant la campagne de production. Pour les plus petits, qui nécessitent une rénovation moins fréquente et ont des coûts d'investissement moins importants, l'avantage de coordonner des améliorations environnementales, avec la réparation des fours est moins significatif. Mais les améliorations environnementales peuvent être plus économiques, si elles se font avec d'autres investissements.

La production totale de l'industrie du verre dans l'UE, en 1996, a été estimée à 29 millions de tonnes, en dehors de la production de fibres céramiques et de frites, une répartition indicative par secteur figure au Tableau 1.1 ci-dessous. Le volume global des ventes a enregistré une croissance constante, au cours des dix dernières années. Toutefois des fluctuations ont été constatées dans chacun des secteurs de production, qui seront examinés plus loin dans le document. L'augmentation de la production totale de verre dans l'UE, et dans les trois principaux secteurs, entre 1986 et 1996 est résumée dans le Schéma 1.1.

Secteur	% de la production totale de l'UE, 1996
verre d'emballage	60
verre plat	22
fibres de verre à fil continu	1,8
verre pour gobeletterie	3,6
verres spéciaux	5,8
laine minérale	6,8
fibres céramiques	-
frites de verre et frites d'émail	-

**Tableau 1.1 : Répartition approximative de la production de verre par secteur**

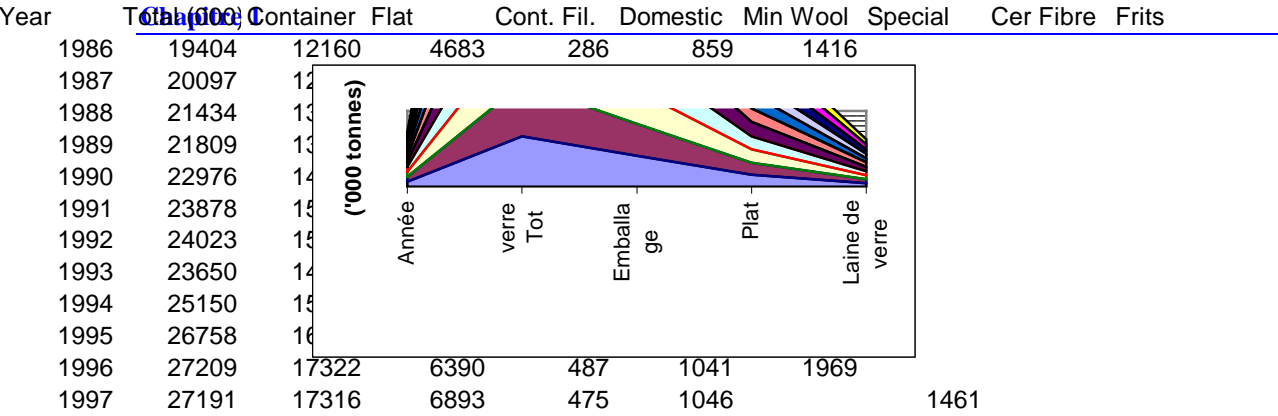


Schéma 1.1 : Production totale de verre entre 1986 et 1996, \*sauf frittes et fibres céramiques

La production varie énormément d’un secteur à l’autre, et les liens entre les différents secteurs sont parfois très minces. Toutefois, le fil qui relie toutes les activités traitées, dans le présent document, est la fusion de matières inorganiques pour faire du verre fondu, ou à une substance semblable au verre, qui est ensuite transformée en produits.

Pour de nombreuses raisons, chaque secteur de production de l’industrie du verre, est une industrie indépendante à part entière, produisant des articles très différents, destinés à des marchés différents et se trouvant confrontée à des problèmes différents. Les paragraphes 1.3 à 1.10, du présent chapitre, fournissent chacun une brève vue d’ensemble de chaque secteur, et cherchent à identifier les principaux facteurs qui les caractérisent. Lorsque cela est possible, les informations sont données de façon comparative, pour chaque secteur. En raison de la différence de structure, d’organisation et de priorités, entre les secteurs, les informations sont parfois d’une précision et d’une nature différente. On doit s’attendre à cela, à cause de l’importance relative de certains paramètres qui sera différente d’un secteur à un autre.

1.2.1 Caractéristiques du verre

[tm21 Schott]

Le terme verre n’a pas une définition unique. Dans son sens le plus large, le terme verre est un terme collectif, servant à désigner un nombre illimité de matériaux de composition différente, ayant des propriétés "vitreuses". Plus particulièrement, ce terme se rapporte à un certain type de matière inorganique, pouvant être assimilé à un solide, mais ayant les propriétés d’un liquide extrêmement visqueux et ne présentant, ni une structure cristalline, ni un point de fusion précis, à savoir un liquide extrêmement refroidi. Dans l’industrie du verre, ce terme est généralement utilisé pour désigner les verres à base de silicate, des substances contenant un pourcentage élevé de silice (SiO<sub>2</sub>) qui, en partant d’un état de fusion initial, dans des conditions normales de refroidissement, forment naturellement du verre.

Les verres ressemblent, par leur structure, aux liquides. Mais ils réagissent, à température ambiante, à l’impact d’une force, par une déformation élastique et doivent donc, en vertu d’un tel comportement, être considérés comme des solides. L’utilisation du terme "verre" est donc généralement limitée aux substances non organiques et ne doit pas être utilisé pour les matières organiques, tels que le plastique transparent.

Certaines substances chimiques peuvent donner une structure vitreuse, comme les oxydes de silicone, bore, germanium, phosphore et arsenic. Lorsqu’une fois fondues, elles sont rapidement soumises à refroidissement, elles deviennent solides sans cristallisation, et forment du verre. Ces substances présentent le même comportement, lorsqu’on les mélange avec d’autres composants

métalliques, dans certaines proportions. L'adjonction de ces composants de modification du verre, par exemple les oxydes de calcium et d'aluminium, modifie les propriétés agglutinantes et les regroupements structuraux, formant les propriétés physiques et chimiques du verre. L'état vitreux ne se limite pas aux oxydes et peut également être observé, lorsque certains composés du soufre et du sélénium sont soumis à un refroidissement rapide. Dans des conditions extrêmes, le verre peut être fabriqué à partir de certains alliages métalliques, qui ne contiennent pas d'oxydes. De nombreux liquides organiques passent à l'état vitreux à basse température, par exemple la glycérine à  $-90^{\circ}\text{C}$ .

Le verre est instable énergétiquement, comparé au cristal au plomb, ayant la même composition chimique. En général, lorsqu'on refroidit une substance fondue, la cristallisation commence lorsque la température tombe en dessous du point de fusion. Dans le verre, ce phénomène ne se produit pas, car les blocs moléculaires, tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  dans le silicate, sont liés les uns aux autres, selon une structure croisée. Pour obtenir des cristaux, ces liens doivent d'abord être brisés, de façon à ce que les noyaux des cristaux puissent se former. Ceci peut se produire uniquement à basse température. Mais à ces températures la viscosité de la fusion empêche la restructuration des molécules et la formation des cristaux. Généralement, la tendance à la cristallisation, dévitrification, diminue au fur et à mesure qu'augmente la vitesse de refroidissement, à l'intérieur de la plage de variation des températures critiques, en dessous du point de fusion, et avec le nombre et le type de composants différents qui constituent la formule.

Les propriétés mécaniques du verre sont plutôt spécifiques. La limite d'élasticité effective du verre est des centaines de fois inférieure à la valeur théorique, calculée à partir de la force de composition chimique. La limite d'élasticité dépend en grande partie de la surface du verre et de la présence de défauts internes. Bien que des traitements tels que le revêtement, le polissage au feu et la précontrainte puissent beaucoup améliorer la limite d'élasticité, celle-ci reste largement en dessous de la valeur théorique.

De nombreuses formules de verre peuvent également se briser à la suite d'un changement rapide de température. Ceci est dû à plusieurs causes, entre autres une mauvaise conductivité de la chaleur, le coefficient d'expansion thermique relativement élevé, des verres à haut contenu d'alcali, et une limite d'élasticité relativement faible. Les verres se divisent en deux catégories. Ceux dotés d'un coefficient d'expansion thermique inférieur à  $6 \times 10^{-6}/\text{K}$  qui sont considérés comme des verres durs. Tandis que ceux qui sont dotés d'un coefficient d'expansion thermique supérieur, sont considérés comme des verres tendres.

### 1.2.2 Classification générique des types de verre

[tm21 Schott]

La classification la plus largement utilisée, pour distinguer les différents types de verre est fondée sur la composition chimique qui donne quatre groupes principaux, les verres sodocalciques, le verre au plomb 24% et le cristal, les verres au borosilicate et les verres spéciaux. Les trois premières catégories représentent plus de 95 % de la production totale de verre. Les milliers de formules spéciales de verre, généralement produites en petites quantités, représentent les 5 % restants. A de rares exceptions près, la plupart des verres sont à base de silicates, le principal composant étant le dioxyde de silicone ( $\text{SiO}_2$ ).

La laine de roche fait exception à ce type de classification, car sa composition chimique habituelle ne rentre dans aucune de ces catégories. La composition habituelle de la laine de roche figure au schéma 2.8.

#### Verres sodocalciques

La grande majorité des verres industriels ont des compositions très semblables et rentrent dans la définition de verre sodocalcique. Le verre sodocalcique est généralement composé de 71 à 75 % de dioxyde de silicone,  $\text{SiO}_2$ , principalement extrait du sable, de 12 à 16 % d'oxyde

de sodium, 'soude'  $\text{Na}_2\text{O}$  contenu dans le carbonate de sodium –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , de 10 à 15 % d'oxyde de calcium,  $\text{CaO}$  contenu dans le calcaire –  $\text{CaCO}_3$ , et de petites quantités d'autres composants, destinés à conférer au verre des propriétés spécifiques. Dans certaines compositions, un certain pourcentage d'oxyde de calcium ou d'oxyde de sodium est remplacé, respectivement, par de l'oxyde de magnésium,  $\text{MgO}$ , et de l'oxyde de potassium,  $\text{K}_2\text{O}$ . Des compositions plus détaillées de certains types de verre, figurent au chapitre 2.

Le verre sodocalcique est utilisé pour la fabrication de bouteilles, de bocaux, de vaisselle ordinaire et de fenêtres. Cette ample utilisation du verre sodocalcique est due à ses propriétés physiques et chimiques. Parmi ces propriétés, la plus importante est l'excellente transmission de la lumière, d'où son utilisation dans le verre plat et dans la fabrication d'articles transparents. Ses propriétés élastiques et thermiques sont suffisantes, pour ce type d'applications, et les matières premières sont, en comparaison, bon marché et leur fusion peu coûteuse. Le coefficient d'expansion thermique est d'autant plus élevé et la résistance au choc thermique et aux agressions chimiques plus faibles que le contenu d'alcali est élevé. Le verre sodocalcique ne convient généralement pas aux applications avec des changements de température brusques ou extrêmes.

### **Cristal au plomb 24% et cristal**

L'oxyde de plomb peut être utilisé pour remplacer la plupart de l'oxyde de calcium, dans la composition, pour obtenir ce type de verre, qui est communément appelé verre au plomb. La composition courante de ce type de verre est de 54 à 65 % de  $\text{SiO}_2$ , de 25 à 30 %  $\text{PbO}$ , oxyde de plomb, de 13 à 15 %  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ , ainsi que d'autres composants secondaires. Ce type de formule, avec un contenu d'oxyde de plomb de plus de 24 %, permet d'obtenir un verre à haute densité, doté d'un indice de réfraction élevé, et donc, d'une excellente brillance et sonorité, pouvant être facilement travaillé et modelé, avec des formes et des décorations différentes. Parmi ces produits figurent les verres à boire de grande qualité, des carafes, des bols et des articles de décoration. L'oxyde de plomb peut être partiellement ou totalement remplacé par des oxydes de baryum, de zinc ou de potassium, pour la fabrication de verres, généralement appelés en cristal, moins brillants et moins sonores que ceux en verre au plomb, 24%. Des définitions plus détaillées associées aux caractéristiques chimiques et physiques figurent dans la Directive 69/493/CEE.

### **Verre au borosilicate**

Le verre au borosilicate contient du trioxyde de bore ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), ainsi qu'un pourcentage plus élevé de dioxyde de silicone. La composition habituelle comprend entre 70 et 80 % de  $\text{SiO}_2$ , de 7 à 15 % de  $\text{B}_2\text{O}_3$ , entre 4 et 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ , et de 2 à 7 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxyde d'aluminium. Les verres ayant ce type de composition présentent une haute résistance à la corrosion chimique et aux variations de température, faible coefficient d'expansion thermique. Parmi les applications de ce type de verre figurent les composants de procédés chimiques, les équipements de laboratoire, les récipients utilisés en pharmacie, l'éclairage, les récipients pour cuisson, les portes de fours et les plaques de cuisson. La plupart des formules de verres au borosilicate sont destinées à des applications techniques, à faible volume de fabrication, et rentrent dans la catégorie des verres spéciaux.

Les verres au borosilicate sont également utilisés dans la fabrication de fibres de verre à fil continu et de laine de verre pour isolation. Le trioxyde de bore possède une excellente résistance chimique et un faible coefficient d'expansion thermique. Mais il est également important dans le défibrage du verre fondu. Les compositions habituelles des fibres de verre diffèrent de la composition mentionnée ci-dessus. Par exemple, la composition du verre E correspond à 53 à 60 % de  $\text{SiO}_2$ , 20 à 24 % d'oxydes d'alcali de terre, 5 à 10 % de  $\text{B}_2\text{O}_3$ , de 5 à 10 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et d'autres composants secondaires. Il faut également noter que, pour les fibres de verre à fil continu, de nouvelles formules au bore ou sans bore, deviennent de plus en plus importantes.

### **Verres spéciaux**

Il s'agit d'une catégorie extrêmement diversifiée, comprenant des produits à faible volume de production et à haute valeur ajoutée, dont la composition varie énormément, en fonction des propriétés requises. Parmi les applications figurent des produits spécifiques au borosilicate, des verres pour produits optiques, pour l'électronique, les tubes cathodiques, le verre de silice, le verre scellé, les tubes pour rayons x, le verre pour soudure, le verre fritté, les électrodes et la vitrocéramique. Vous trouverez de plus amples informations sur les verres "techniques" au chapitre 2.

### 1.2.3 Origines historiques

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm21 Schott]

Le verre existe en milieu naturel. Par exemple, l'obsidienne, dont la composition peut être comparée à celle du verre fabriqué en usine, est présente dans les régions volcaniques. Ce matériau, dont les principaux composants sont le dioxyde de silicone et des composés de sodium et de calcium, était utilisé par les premiers hommes pour fabriquer des pointes de flèches et des lances, ainsi que des couteaux. Les tectites qui proviennent de la solidification de roches fondues vaporisées, dans l'atmosphère, au moment de l'impact des météorites avec la surface de la terre, et les fulgurites, qui se forment à la suite de l'impact de la foudre sur le sable sont d'autres formes naturelles de verre.

Bien qu'on ignore à quelle date on commença à produire du verre artificiellement, les premières traces de ce type de production remontent à environ 3 500 ans av. J.C. On pense que les origines de la fabrication du verre remontent à l'Égypte et à la Mésopotamie, et se sont développées ensuite, en Chine, en Grèce et dans le nord du Tyrol. La fabrication ancienne du verre serait liée à la production de la céramique et du bronze, dont le verre aurait été un sous-produit. Il était utilisé, entre autres, dans l'Antiquité, pour la fabrication de bijoux et de petits flacons. La production de verre commença à augmenter, de manière importante, environ à partir de 1 500 av. J.C. Lorsqu'on commença à fabriquer des objets de plus grandes dimensions, destinés à un usage plus utilitaire, des bols, des récipients et des coupes, en moulant du verre autour d'un noyau de sable ou d'argile. La première véritable révolution technique, dans la fabrication du verre, eut lieu au cours du premier siècle av. J.C., en Palestine ou en Syrie, avec la découverte des tuyaux pour le soufflage du verre. Cette technique consistait à prendre du verre fondu et à le placer à l'extrémité d'une canne de soufflage, à l'intérieur de laquelle l'artisan soufflait, pour créer une forme creuse. Cette technique, qui permettait de fabriquer une grande variété de formes, se répandit très vite en Occident, entre autres en France et en Italie.

La fabrication du verre se développa plus tard, en Europe, au cours du Moyen Âge, et Venise devint la capitale européenne de la fabrication du verre soufflé. Au XIV<sup>e</sup> siècle, les ateliers de verrerie se développèrent sur tout le continent européen et, à la même époque, la fabrication du verre plat, pour vitrages s'imposa en France. Pendant des siècles, le verre fut soufflé à l'aide d'une canne, dans de grandes formes cylindriques, avant d'être découpé et aplati, pendant qu'il était encore chaud. Seules de petites quantités de verre pouvaient être commercialisées et le verre à vitrages était produit en très petites quantités. La nouvelle technique consistait à souffler une sphère de verre avec le tuyau, en l'ouvrant, ensuite, à l'une des extrémités, du côté opposé à celui par lequel la sphère était reliée au tuyau et en la faisant tourner, jusqu'à ce qu'elle soit aplatie. Après la découverte des plaques à couler, en 1688, sous le règne de Louis XIV, on commença à fabriquer des miroirs de grandes dimensions. A la même époque, les fabricants de verre anglais développèrent la fabrication du verre au plomb, permettant d'obtenir un verre extrêmement transparent, au son cristallin.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, certaines manufactures produisaient déjà plus d'un million de bouteilles par an, environ 3 tonnes/jour, par la technique de soufflage. Pendant la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle, d'importants progrès techniques eurent lieu. Pour alimenter les fours, on utilisait le charbon à la place du bois. Les premières machines automatiques furent utilisées. Et de l'air comprimé était soufflé à l'intérieur de moules métalliques, dans la fabrication du verre soufflé.

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Friedrich Siemens inventa le four en continu, grâce auquel on pouvait produire de gros volumes de verre en continu, tout en utilisant des machines.

Deux importants progrès eurent lieu, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, la mécanisation complète de la fabrication des bouteilles, avec l'introduction de la première machine SI, à section individuelle, vers 1920, et l'invention du procédé de float, pour la fabrication du verre plat, en 1962. Aujourd'hui, la production d'une machine SI peut dépasser 500 bouteilles/minute et celle de verre float peut atteindre 900 t/j.

### 1.3 Verre d'emballage

#### 1.3.1 Généralités du secteur

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

La production de verre pour emballages constitue le plus important secteur de l'industrie du verre européenne, avec environ 60 % de la production totale de celui-ci. Ce secteur couvre la production d'emballages de verre, principalement, les bouteilles et les bocaux, mais aussi, dans une certaine mesure, celle de vaisselle industrielle. En 1997, ce secteur produisait plus de 17,3 millions de tonnes d'articles de verre, dans les 295 fours distribués sur tout le territoire de l'UE. Cette production est assurée par 70 entreprises, dotées de 140 installations, qui emploient directement 50 000 personnes. Le verre d'emballage est fabriqué dans tous les Etats Membres, à l'exception du Luxembourg. La croissance annuelle de ce secteur étant de 1,8 % ,cf. Schéma 1.1, avec un chiffre d'affaires de plus de 6 milliards d'euros, en 1997.

Plus de la moitié de la production de l'Union Européenne est assurée par les dix grands producteurs qui figurent au Tableau 1.2 ci-dessous. Les entreprises ont été rassemblées par zone géographique et ne figurent pas par ordre de taille. A la date de la rédaction du présent document, le plus gros producteur de verre d'emballage, dans l'UE, était le groupe français Saint-Gobain, suivi de Danone, Gerresheimer et AVIR. L'Europe Occidentale est le principal producteur de verre d'emballage, suivi des Etats Unis et du Japon. La distribution géographique du secteur et les installations par ordre de taille figurent au Tableau 1.3 et au Tableau 1.4.

Société	Pays	Propriétaire
B S N	France	Danone ,France,
Saint Gobain Emballage	France	Saint Gobain ,France,
Gerresheimer Glas	Allemagne	VIAG ,Allemagne,
Oberland Glas	Allemagne	Saint Gobain ,France,
AVIR	Italie	Owens Illinois ,USA,
Vetriere Italiana VETR.I	Italie	Saint Gobain, France
Vereenigde Glasfabrieken	Pays Bas	Groupe Danone ,France,
Vicasa	Espagne	Saint Gobain ,France,
Rockware Glass	RU	Owens Illinois ,USA,
United Glass	RU	Owens Illinois ,USA,

**Tableau 1.2 : Principaux producteurs de verre d'emballage dans l'UE (1997)**



Etat Membre	Nombre d'installations	Nombre de fours	% Distribution de la Production dans l'UE
Allemagne	33	70	26
France	22	54	20
Italie	32	54	17
Royaume Uni	14	32	11
Espagne	14	23	10
Portugal	6	17	16
Pays Bas	5	13	
Autriche	4	9	
Belgique	4	9	
Grèce	2	5	
Finlande	1	2	
Danemark	1	3	
Irlande	1	2	
Suède	1	2	
Total	140	295	17 316 000 tonnes en 1997

**Tableau 1.3 : Distribution des installations de production de verre d'emballage dans les états membres**

Volume de la production (Tonnes/jour)	<150	150 à 300	300 à 600	600 à 1000	>1000
Nombre d'Installations dans chaque catégorie de volume	14	37	57	28	4

**Tableau 1.4 : Nombre d'installations de production de verre d'emballage, en fonction du volume de production**

### 1.3.2 Produits et Marchés

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le verre d'emballage est généralement fabriqué à partir d'une formule spéciale de chaux sodée et fondue, dans des fours à combustible fossile ou, plus rarement, dans des fours électriques. Le verre fondu est ensuite façonné, pour obtenir les différents types de produits, par des machines SI, à sections individuelles, automatisées, dans lesquelles les agents colorants nécessaires sont ajoutés au verre et les traitements superficiels adaptés sont appliqués aux produits finis.

Les principaux produits du secteur du verre d'emballage sont les bouteilles, destinées à contenir du vin, de la bière, des boissons alcoolisées, des boissons non alcoolisées, ainsi que des bocaux destinés à l'industrie agroalimentaire. Ces produits sont généralement considérés comme des produits de consommation, tandis qu'une autre partie importante de ce secteur est représentée par la production de flacons à haute valeur ajoutée, pour l'industrie pharmaceutique et la parfumerie. La majorité de la production est destinée à d'autres entreprises de l'UE qui, à leur tour, vendent leurs propres produits, emballés sur les différents marchés de l'UE et dans le monde entier. L'importance relative des entreprises clientes varie considérablement entre les différents Etats Membres. Cette variété est reflétée par l'extrême diversité des marchés nationaux de verre d'emballage et des produits qu'ils demandent, notamment en ce qui concerne la couleur, la forme, la taille et la conception.

Les entreprises clientes sont réparties dans trois grands secteurs industriels. Les industries productrices de boissons représentent environ 75 % du tonnage total de la fabrication d'emballages en verre. Cela comprend les vins, les vins mousseux et les champagnes, les vins cuits, les spiritueux, les bières, les boissons non alcoolisées, les jus de fruit et les eaux minérales. Le secteur agroalimentaire représente environ 20 % de la production totale. Il s'agit principalement de bocaux. Ceci représente une vaste gamme de produits, comme les conserves sous vide ou les produits conservés dans un liquide, le lait et les produits laitiers, les confitures et autres produits à étaler, les sauces et les assaisonnements, l'huile, le vinaigre, etc. Les flacons destinés à la parfumerie et aux produits pharmaceutiques représentent les 5 % restants, de la production de verre d'emballage.

Une des caractéristiques importantes de ce secteur c'est que les distances de livraison se limitent, en général, à quelques centaines de kilomètres. Car pour les emballages le coût du transport est relativement élevé, par rapport au prix de vente. Par ailleurs, il existe des marchés locaux ou régionaux, qui ont des exigences spécifiques, en matière d'emballages en verre, surtout en ce qui concerne les boissons alcoolisées, dans certaines régions viticoles, ou pour les bouteilles de whisky, de cognac, champagne et bière, ce qui a empêché une concentration rapide du marché. Même les entreprises qui ont été absorbées, par de plus grands groupes, ont tendance à conserver leur identité locale et leur clientèle propre.

### 1.3.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le secteur de la production du verre d'emballage est un secteur qui a atteint sa pleine maturité et qui s'adresse à des marchés extrêmement dynamiques. Sa croissance globale a été relativement faible, au cours des dix dernières années. En dehors des inévitables changements qui interviennent au niveau local ou de façon temporaire, la tendance globale devrait se poursuivre à moyen terme. Toutefois, la concurrence, provenant d'autres types d'emballages devrait représenter une menace de plus en plus pressante pour ce secteur.

En 1997, sans tenir compte des variations régionales, ce secteur exploitait environ 90 % de sa capacité de production. Ce qui représentait une variation comprise entre 84 % et 95 %, par rapport à la décennie précédente. Le grand nombre de fours et le caractère compétitif de cette activité, assurent une certaine auto-réglementation de la capacité. Bien que les fours aient une longue durée de vie, leur grand nombre signifie que, chaque année, une part considérable des équipements de production approchent de la date de réfection. Dans le secteur du verre d'emballage, la surcapacité constitue, généralement, un phénomène localisé et de courte durée. La concurrence, provenant d'autres matériaux, constitue un facteur important des prix.

Compte tenu du coût du transport, la plupart des produits sont vendus dans un rayon de 500 km autour de leur lieu de production, ce qui limite les importations et les exportations. En 1997, les exportations de l'UE dépassaient les importations d'environ 8 %, soit 453 000 tonnes contre 417 000 tonnes. Le commerce total en dehors de l'UE représente seulement 5 % de la production du secteur, qui est de 17,3 millions de tonnes. Toutefois, certaines zones périphériques de l'UE peuvent subir une concurrence relativement agressive, de la part de pays ne faisant pas partie des Etats Membres, et qui ont des prix beaucoup plus bas, avec un niveau de qualité acceptable. En particulier en ce qui concerne les produits à faible valeur ajoutée. Il ne faut, toutefois, pas oublier que, même si les emballages eux-mêmes sont vendus principalement au niveau local, les produits emballés sont, en grande partie, destinés au commerce en dehors du territoire de l'UE.

Le marché du verre d'emballage peut être affecté par un grand nombre de facteurs. La principale menace est constituée par les autres matériaux d'emballage, en particulier les métaux, acier et aluminium, et les matières plastiques. Les principaux désavantages du verre, ce sont son poids d'où les coûts élevés du transport, et les risques de casse. Ses principaux avantages sont sa

facilité de nettoyage et sa possibilité de réutilisation et de recyclage, sa transparence, son inertie chimique et son image de qualité, pour les produits haut de gamme. Le positionnement relatif du verre, par rapport à ses concurrents, varie largement de région à région, et de produit à produit, en fonction de l'évolution des préférences du marché, des coûts et de l'emballage.

D'autres facteurs importants sont associés aux fluctuations de la demande de produits emballés. Par exemple, l'évolution des habitudes des consommateurs, telles que la tendance à consommer moins de vin, mais de meilleure qualité. Des facteurs climatiques, tels que l'importance des récoltes et l'augmentation de la consommation de bière et de boissons non alcoolisées, pendant l'été, peuvent avoir également une certaine influence. Les fluctuations des taux de change des devises, ainsi que la conjoncture économique locale, affecteront la demande d'articles de luxe, tels que les parfums et les alcools.

La fabrication du verre est une activité qui demande des investissements lourds, ce qui limite l'entrée sur le marché aux entreprises d'assez grandes dimensions, dotées de solides moyens financiers. Une lente croissance à long terme signifie que, bien qu'on construise de nouveaux fours, ces fours seront probablement bâtis par des entreprises déjà présentes dans une région donnée, ou par d'autres entreprises déjà existantes qui viennent s'implanter dans celle-ci. L'augmentation du chiffre d'affaires sera le résultat, en grande partie, de l'amélioration des installations déjà existantes, aux échéances prévues pour la réfection des fours. La tendance à l'absorption des petites entreprises par de grands groupes est en train de s'affirmer.

En général, les fours pour la production de verre d'emballage, fonctionnent en continu, ou avec peu de réparations intermédiaires, pour des périodes pouvant aller jusqu'à 12 ans. Après quoi ils sont soumis à une réfection, avec remplacement total ou partiel de la structure, en fonction de l'état du four. La réfection complète d'un four de moyennes dimensions, environ 250 tonnes par jour, coûte entre 3 et 5 millions d'euros. Les frais réels peuvent être encore plus élevés. Car la réfection du four peut donner lieu à des améliorations du procédé de fabrication. Une nouvelle installation de taille comparable, dans une zone industrielle nouvelle, peut coûter entre 40 et 50 millions d'euros, avec les infrastructures et les services.

### 1.3.4 Principaux problèmes liés à l'environnement

Le principal problème, en matière de protection environnementale, lié à la production de verre d'emballage, est qu'il s'agit d'une activité à haute température et à forte consommation d'énergie. Cela provoque l'émission de produits de la combustion et de l'oxydation, à haute température de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles, présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, fluorures et métaux présents sous forme de scories dans les matières premières. Différentes solutions techniques peuvent être adoptées pour diminuer ces émissions. Mais chacune d'entre elles a des implications d'ordre financier et environnemental.

Le volume des déchets solides, produits par ce secteur, est très faible. L'utilisation croissante de verre recyclé constitue un progrès remarquable. Le pourcentage moyen des déchets de la consommation, utilisés dans le secteur de la production de verre d'emballage, dans l'UE représente environ 50 % du total des matières premières employées, certaines installations utilisant jusqu'à 90 % de calcins recyclés. Le verre offre un très net avantage, par rapport aux autres matériaux d'emballage parce qu'il peut être facilement réutilisé et recyclé. En général, la production de verre d'emballage ne représente pas un danger important d'émissions dans l'eau. L'eau est principalement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement et peut être facilement traitée et réutilisée.

D'importantes améliorations environnementales ont été apportées, dans ce secteur, avec une réduction considérable des émissions et de la consommation d'énergie. Des progrès ont été

notamment réalisés, par l'application de techniques primaires, de réduction des émissions d'oxydes d'azote et de dioxyde de soufre.

## 1.4 Verre plat

### 1.4.1 Généralités du secteur

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le verre plat est le deuxième secteur le plus important de la production du verre dans l'UE. Il représente environ 22 % de la production totale de verre. Ce secteur couvre la fabrication de verre float et de verre coulé. En 1997, ce secteur a produit environ 6,9 millions de tonnes de verre, dans les 40 bains de float, fonctionnant sur le territoire de l'UE. Cinq fabricants de verre float et quatre fabricants de verre coulé sont implantés dans l'UE. Le verre plat est produit dans onze Etats Membres, à l'exception de l'Autriche, du Danemark, de la Grèce et de l'Irlande.

Ce secteur emploie directement 12 500 personnes, dans la fabrication du verre, tandis que 90 000 autres sont employées dans la transformation du verre, destiné aux secteurs de la construction et de l'automobile. La production de verre plat a considérablement augmenté entre 1986 et 1997 ,cf. Schéma 1.1, en partie grâce à l'entrée de la Suède et de la Finlande dans l'UE, en 1995. Toutefois, la demande fluctue considérablement, d'une année sur l'autre. Par exemple, en 1997 on a enregistré une croissance particulièrement significative de 6 %, tandis que la croissance annuelle prévue entre 1998 et 2000 est de 2 à 3 %.

La fabrication du verre plat est une activité pratiquée à l'échelle mondiale et dominée par cinq principaux groupes. Par ordre de chiffre d'affaires mondial, il s'agit de Asahi, Japon, Pilkington, Royaume Uni, Saint-Gobain, France, PPG Industries, Etats Unis, et Guardian Industries, Etats Unis. La production dans l'UE est dominée par Pilkington et Saint-Gobain, qui détiennent plus de 70 % du marché. Jusqu'à une époque récente, les cinq groupes possédaient des sites de production dans l'UE. PPG a vendu ses usines européennes de production de verre float, 2 en Italie et 2 en France, à la société belge Glaverbel, dont la majorité est détenue par Asahi. Les résultats des producteurs européens de verre float, pour l'année 1997, figurent au Tableau 1.5. Quatre nouveaux bains de float seront construits, dans l'UE entre 1998 et 2000, respectivement en Allemagne, au Royaume Uni, en Italie et en Espagne. Ces quatre installations devraient assurer une production de 450 à 600 tonnes /jour.

Société	Nombre de bains	Localisation
Saint-Gobain	13	Allemagne ,4, France,3, Belgique ,2,Espagne ,2, Italie 1Portugal ,1.
Pilkington	12	Allemagne ,4, RU ,3, Italie ,3, Finlande ,1, Suède ,1
Glaverbel	9	Belgique ,4, France,2, Italie,2, Pays Bas ,1
Guardian	5	Luxembourg ,2, Espagne ,2, Allemagne,1
Euroglas	1	France ,1

Tableau 1.5 : Localisation des bains métalliques dans l'UE en 1997

La répartition géographique de ce secteur ainsi que les dimensions des installations figurant au Tableau 1.6 et au Tableau 1.7.

Etat Membre	Nombre de bains métalliques	% Répartition de la Production dans l'UE
Allemagne	9	20
France	6	15
Italie	6	15
Belgique	6	15
Royaume Uni	3	10

Espagne	4	10
Finlande	1	14
Pays Bas	1	
Luxembourg	2	
Portugal	1	
Suède	1	
Autriche	-	<1
Danemark	-	
Grèce	-	
Irlande	-	
Total	40	6 893 000 tonnes en 1997

Tableau 1.6 : Nombre de bains métalliques dans les Etats Membres en 1997

Capacité ,tonnes/jour,	<400	400 à 550	550 à 700	>700
% capacité dans chaque catégorie dans l'UE	3	31	38	28
% capacité dans chaque catégorie dans le monde entier	17	47	20	16

Tableau 1.7 : Pourcentage de capacité dans le secteur du verre float dans les catégories indiquées

### 1.4.2 Produits et marchés

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Deux types de verre plat sont produits dans l'UE, le verre coulé et le verre float. Bien qu'à proprement parler, il existe d'autres types de verre plat, ceux-ci ne sont pas considérés comme rentrant dans cette catégorie, soit parce qu'ils sont couverts par le secteur des verres spéciaux, soit parce qu'ils ne sont pas conformes au critère de 20 tonnes de production/jour, imposé par la Directive 96/61/CE. La plupart du verre coulé est imprimé ou armé et représente environ 5 % de la production totale. Le verre imprimé est principalement utilisé pour les serres horticoles, pour des objets décoratifs et dans toutes sortes d'applications comportant une dispersion de la lumière, comme par exemple, dans les cloisons en verre et dans les fenêtres de salle de bains. Le verre float représente les 95 % restants de la production et il est principalement employé dans la production pour le bâtiment et l'automobile.

Avant l'invention du verre float par Pilkington, en 1962, il existait deux types principaux de verre non imprimé, le verre étiré et le verre poli. La méthode la plus largement utilisée, pour la fabrication du verre étiré, était le procédé Pittsburgh qui consiste à tirer verticalement le verre à partir de la cuve. Un système de guidage réfractaire est placé dans le verre à l'endroit où a lieu l'étirement et des bras mécaniques refroidis, munis de pinces, reçoivent le verre. Le verre passe ensuite dans un tunnel de recuit, de 12 mètres environ, avant d'être découpé selon la forme voulue. Avant le verre float, le verre poli était le verre de plus grande qualité, disponible sur le marché. Le verre poli est produit à partir de verre coulé ou d'une feuille de verre épaisse, par dépolissage et polissage, à l'aide de disques rotatifs, sur de grandes tables ou des tapis roulants.

Le procédé "double" consiste à polir le verre des deux côtés en même temps. Le procédé de broyage et de polissage génère de grosses quantités de déchets solides, destinés à être éliminés.

Les avantages, présentés par le procédé de float, moindre coût, gamme de produits, faible quantité de déchets et qualité, sont tels que, depuis son introduction, en 1962, le verre étiré et le verre poli ont été progressivement remplacés et ne sont plus produits dans l'UE. Certains types de produits en verre coulé sont encore polis, pour certaines applications spécifiques, et de petits volumes de verre étiré et de verre poli sont encore fabriqués, dans certaines parties du monde. Aux fins du présent document, la production du verre étiré et du verre poli peuvent être considérées comme obsolètes.

Les principaux marchés, pour le verre float, sont le bâtiment et l'automobile. Le plus important des deux est le premier, qui représente 75 % à 85 % de la production, tandis que la plupart des 15 % à 25 % restants servent à la fabrication de vitres pour l'industrie automobile. Certains verres sont simplement découpés, selon les dimensions voulues et utilisés directement. Mais la majorité de la production de verre plat est transformée en d'autres produits. Pour l'industrie automobile, il s'agit de pare-brise en verre feuilleté, de vitres latérales et arrière et de toits ouvrants. Le principal produit transformé, destiné au bâtiment ce sont des doubles ou triples vitrages isolants, souvent dotés d'une couche de verre stratifié. Ce type de vitrages représente 40 % à 50 % du marché de la construction, le reste étant constitué de produits argentés, stratifiés, renforcés et feuilletés représentant, chacun, 10 % à 15 %.

### 1.4.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

En moyenne, le commerce global hors UE représente environ 20 % de la production de l'UE, avec une balance commerciale légèrement positive. Quelque 10 % de la production sont exportés vers des pays n'appartenant pas à l'UE, tandis qu'un chiffre similaire, mais légèrement inférieur représente les importations vers l'UE, en grande partie en provenance de l'Europe de l'est. Ces données sont valables, aussi bien pour les produits non transformés, que pour les produits transformés. Le verre plat est cher à transporter et les producteurs recherchent des clients situés dans un rayon le plus proche possible du site de production. Toutefois, avec 40 lignes de production de verre float seulement dans l'UE, et une intense concurrence entre les différents producteurs, les distances sur lesquelles le verre est transporté peuvent être substantielles. Mais elles sont, en dernière analyse, limitées par les coûts. La plupart du verre fabriqué et transformé dans l'UE est vendu en Europe Occidentale .

La production de base de verre plat est une activité de production qui a fait ses preuves, cyclique, essentiellement destinée à des produits de consommation. Entre 1986 et 1997, ce secteur a enregistré une croissance significative, bien que parfois irrégulière de la production, tandis que la croissance annuelle devrait avoisiner une moyenne de 2 % à 3 %, entre 1998 et 2000. Toutefois, la surcapacité, a provoqué une grosse pression sur les prix, avec une baisse réelle des prix du verre entre 1992 et 1997. Les prix peuvent fluctuer d'un marché à l'autre. Mais ils ont été particulièrement bas en Allemagne, le principal pays producteur. La demande de verre plat est particulièrement sensible aux cycles économiques. Car elle dépend, en grande partie, de l'industrie du bâtiment et de l'automobile. Pendant des périodes de croissance économique et de forte demande, le verre plat peut représenter une activité extrêmement rentable. Tandis que pendant des périodes de récession, c'est le contraire.

L'exploitation de la capacité a fluctué de 79 % à 92 %, entre 1987 et 1997, tandis qu'elle n'a pas dépassé 86% entre 1990 et 1997. On estime, généralement, que la rentabilité à long terme demande une exploitation de la capacité de plus de 90 %. La faible croissance prévue ne devrait pas réduire la surcapacité à brève échéance, la situation étant encore aggravée par la surcapacité en Europe de l'est. La fabrication du verre plat, en particulier, est une activité à forts investissements, qui exige d'importants moyens financiers, des investissements à long terme et



une grande compétence technique. Par conséquent, le nombre de fabricants internationaux est limité et leur taille considérable. Bien que de plus petits fabricants existent également. Mais ce phénomène est de plus en plus rare.

Les fours, pour la production de verre plat, fonctionnent en continu pendant 8 à 12 ans. Après cette période, ils sont refaits, avec remplacement total ou partiel de la structure, en fonction de l'état du four. Une réfection importante peut coûter entre 30 et 50 millions d'euros, tandis qu'une nouvelle ligne de production de verre float, en moyenne 500 tonnes /jour, pourrait coûter environ 100 millions d'euros.

#### 1.4.4 Principaux problèmes environnementaux

Le principal problème environnemental lié, à la production du verre plat, est qu'il s'agit d'un procédé à haute température et à forte consommation d'énergie. Cela provoque l'émission du produit de la combustion et l'oxydation à haute température de l'oxyde d'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, fluorures et métaux, présents sous forme de scories, dans les matières premières. Différentes solutions techniques peuvent être adoptées, pour diminuer ces émissions. Mais chacune d'entre elles a des implications d'ordre financier et environnemental.

Les calcins, générés sur le site, sont directement recyclés dans le four. Ce secteur a réalisé des progrès considérables dans le recyclage des déchets, provenant du procédé de fabrication et de la consommation. Le calcin, généré par le verre plat, constitue une matière première précieuse pour les autres secteurs de l'industrie du verre, notamment pour la production de verre d'emballage et on estime qu'environ 95 % des calcins, générés par le procédé de production, sont recyclés d'une façon ou d'une autre. En général, la production de verre plat ne présente pas d'importants problèmes d'émissions aqueuses. L'eau est essentiellement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement et peut être facilement traitée et réutilisée.

D'importantes améliorations ont été réalisées dans la fabrication du verre plat. Les émissions ont été réduites de manière considérable et la consommation d'énergie a nettement diminué. En 1995, la consommation moyenne d'énergie, par tonne de verre fondu, était inférieure à celle de 1975 de plus de 30 %, et avait baissé de plus de 60 %, par rapport à celle de 1960. Les niveaux de consommation, pour la fusion, approchent actuellement du minimum théorique.

Lorsqu'on analyse l'impact global de la production du verre plat sur l'environnement, il convient d'analyser certains des avantages que présentent ses produits pour la protection environnementale. Par exemple, la consommation totale d'énergie liée, à la production de vitrages, comprend à la fois l'énergie consommée pour leur fabrication, et l'impact sur la consommation d'énergie du bâtiment, dans lequel ils sont installés, pendant toute leur durée de vie, disons une trentaine d'années. Dans les cas des doubles vitrages, à faible émission les plus avancés, la dispersion de chaleur est réduite à moins de 20 %, par rapport aux simples vitrages et à moins de 40 %, par rapport aux doubles vitrages standard. Ceci peut avoir un impact important sur la consommation d'énergie, dans les édifices. Les produits de pointe, destinés à l'industrie automobile, contribuent à réduire la consommation de carburant, en diminuant le poids du véhicule, ainsi que la charge du système de climatisation, par l'utilisation de vitres solaires.

Le secteur du bâtiment représente environ 40 % de la consommation d'énergie de l'UE, dont la moitié est utilisée pour alimenter les systèmes de chauffage domestique. Environ 60 % des habitations, dans l'UE, possèdent encore de simples vitrages. L'énergie qu'on économise par l'emploi de doubles vitrages, à faible émission, pourrait contribuer à éviter l'émission de 80 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Pendant toute la durée de vie des doubles vitrages, la

réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, obtenue par l'emploi de vitres plastifiées, à faible émission, devrait compenser les émissions générées par l'application du revêtement en usine de 1 pour 1 000.

## 1.5 Fibres de verre à fil continu

### 1.5.1 Généralités du secteur

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

La production de fibres de verre, à fil continu, représente l'un des plus petits secteurs de l'industrie du verre, en termes de tonnage. Mais ses produits possèdent une valeur ajoutée relativement élevée, comparée au rapport de masse. Ce secteur couvre la fabrication de fils de verre continu qui sont ensuite transformés en d'autres produits. Il s'agit d'une production distincte de celle des produits isolants, en fibre de verre, qui sont fabriqués à partir d'un procédé différent et qu'on appelle généralement laine de verre. En 1997, ce secteur a produit 475 000 tonnes de fibres, dans les 26 fours, fonctionnant sur les 12 sites de l'UE. En 1996, l'effectif employé par ce secteur était de 6 750 personnes.

Le secteur a enregistré une bonne croissance, entre 1986 et 1995, année pendant laquelle la production a atteint un pic de 488 000 tonnes, pour baisser ensuite légèrement, en 1996, puis de façon plus importante, 2,5 %, en 1997. L'UE compte cinq producteurs, Ahlstrom, Bayer, Owens Corning, PPG Industries et Vetrotex. Le plus important est Vetrotex, filiale de Saint-Gobain, avec des sites de production en France, Allemagne, Italie et Espagne. Le deuxième grand producteur de l'UE est Owens Corning, implanté en Belgique, France, Royaume Uni et Norvège, suivi de PPG aux Pays Bas et au Royaume Uni.

D'un point de vue global, les Etats Unis sont le plus gros producteur, dans ce secteur, avec plus de 40 % de la production mondiale, l'Europe et l'Asie représentant chacune 20 % à 25 %. Le principal fabricant mondial est Owens Corning suivi de Vetrotex et PPG. La distribution géographique de ce secteur, ainsi que la taille des fours, par catégorie, figurent au Tableau 1.8 et au Tableau 1.

Etat Membre	Nombre d'installations	Nombre de fours en fonction en 1997	% Distribution de la Production dans l'UE
<b>Europe du Nord</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>43</b>
Allemagne	1	1	
Finlande	1	3	
Pays Bas	1	2	
Royaume Uni	2	4	
<b>Europe centrale et du sud</b>	<b>7</b>	<b>16</b>	<b>57</b>
France	2	4	
Belgique	2	7	
Italie	2	3	
Espagne	1	2	
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>26</b>	<b>475 000 tonnes en 1997</b>

Tableau 1.8 : Nombre d'installations pour la production de fibres de verre à fil continu et de fours dans les Etats Membres

Volume de production Tonnes/jour	<27	27 à 55	55 à 82	>82
Nombres de fours dans chaque catégorie de volume 1997	6	7	9	4

**Tableau 1.9 : Nombre de fours pour la production de fibres de verre, à fil continu dans les catégories de volume de production indiquées**

### 1.5.2 Produits et marchés

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Les fibres de verre à fil continu sont produites et livrées sous une grande diversité de formes stratifil, matelas de fibres de verre, fils coupés, produits textiles, fil, tissu et fibres broyées. La principale application finale, environ 75 %, est le renforcement de matériaux composites, notamment des résines thermodurcissables, mais également les thermoplastiques. Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, dans l'UE et de nouvelles applications sont sans cesse en cours de développement.

Les principaux marchés pour les matériaux composites sont le secteur du bâtiment, l'industrie automobile, et les transports, ainsi que l'industrie électrique et électronique. Ils sont également utilisés pour la fabrication de tubes et de cuves, d'équipements agricoles, de machines industrielles, ainsi que dans le sport, les loisirs et le secteur nautique. La deuxième utilisation finale la plus importante est la fabrication de textiles, employés dans des secteurs similaires à ceux des matériaux composites, mais pour des applications différentes. Le principal marché pour les textiles en fibres de verre est l'électronique, où ils sont utilisés pour la production de circuits imprimés.

Sa clientèle s'élargit et se diversifie constamment, et la commercialisation des fibres de verre s'internationalise. Ce qui rend ce secteur moins vulnérable que d'autres secteurs du verre, par rapport aux problèmes économiques spécifiques à certains marchés ou à certaines zones géographiques. Toutefois, environ 50 % de la production est absorbée par le bâtiment, l'automobile et les transports.

### 1.5.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Les fibres de verre, à fil continu, enregistrent une bonne croissance à long terme. Ses produits, dotés d'une valeur ajoutée relativement élevée, peuvent être facilement transportés et les exportations sont importantes. Bien que la demande de ce type de produit soit en augmentation constante, la forte concurrence qui sévit exerce une pression importante sur les prix, limitant ainsi la rentabilité. L'exploitation de la capacité de production tournait autour de 95 % entre 1994 et 1997, alors qu'elle n'était que de 75 % en moyenne, entre 1990 et 1993.

En 1996, les exportations et les importations représentaient, respectivement, 27 % et 30 % de la production de l'UE, avec une balance commerciale légèrement négative. Au cours des années précédentes, les importations avaient été légèrement supérieures, surtout en provenance de l'Europe de l'est et de l'Amérique du Nord. La fabrication des fils de verre est une activité qui demande d'importants capitaux et des moyens financiers considérables, des investissements à long terme et une compétence technique élevée. D'où, le nombre limité et les dimensions importantes des grandes entreprises internationales du secteur. Les petits fabricants existent, mais ils sont rares.

Les fours pour la fabrication de fibres de verre fonctionnent sans interruption, pour des périodes de 8 à 12 ans. Après ils sont refaits, avec remplacement total ou partiel de la structure, en fonction de l'état du four. La réfection complète, d'un four de moyennes dimensions, environ 75 tonnes par jour, coûte environ 8 millions d'euros. Une nouvelle installation de taille comparable, dans une zone industrielle nouvelle, peut coûter entre 75 et 90 millions d'euros, avec les infrastructures et les services.

### 1.5.4 Principaux problèmes liés à l'environnement

La production de fibres de verre, à fil continu, est une activité à faible production de déchets, comparée à d'autres activités industrielles. Toutefois, elle peut causer des ruptures qui, à leur tour, provoquent une augmentation du niveau de déchets, par tonne de produit, supérieure à la moyenne de l'industrie du verre. Au moment de la rédaction de ce document, seule une petite quantité de ces déchets est recyclée dans le procédé. Bien que des solutions autres que l'élimination des déchets dans les décharges publiques aient été développées.

En général, la production de fils de verre ne devrait pas présenter de problèmes majeurs de d'émissions dans l'eau. L'eau est principalement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement. Mais le risque d'émission est associé à l'utilisation de certains matériaux de revêtement. Les émissions peuvent être générées par la préparation et la manipulation des revêtements, la mise hors pression de l'enroulement et les opérations de traitement secondaires. Les émissions peuvent être réduites, grâce à l'application de techniques spécifiques de manipulation et de limitation des déversements accidentels. Tandis que les niveaux d'émissions résiduelles peuvent être traités par des techniques standard.

Le principal problème environnemental, lié à la production de fibres de verre, c'est la haute température et la forte consommation d'énergie. Cela provoque l'émission des produits de la combustion et l'oxydation de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles, présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures et de métaux, présents sous forme de scories dans les matières premières.

Etant donné la nature du procédé de production des fibres, différentes quantités de fluorures peuvent être utilisées, dans la composition, qui provoquent l'émission de fluorure d'hydrogène. Il s'agit là d'un problème complexe, dont nous allons traiter de façon détaillée au chapitre 4. Des solutions techniques sont disponibles, pour réduire les niveaux d'émission. Chaque technique ayant, toutefois, différentes implications techniques et financières. D'importants progrès ont été réalisés, dans la production de fils de verre, où les émissions ont été réduites de manière considérable, ainsi que la consommation d'énergie.

En analysant l'impact global de ce secteur sur l'environnement, il faut également prendre en considération certains avantages environnementaux, liés aux matériaux composites, qui constituent la principale destination finale des fibres de verre. En plus des nombreux avantages techniques qu'ils présentent, le procédé de fabrication des matériaux composites génère une consommation d'énergie inférieure à celle de la fabrication des matériaux, remplacés par les matériaux composites, en particulier l'acier et l'aluminium. Ils sont plus légers à transporter, ce qui permet des économies de carburant, et ils possèdent une durée de vie supérieure, grâce à leur résistance élevée à la corrosion.

## 1.6 Verre pour gobeletterie

### 1.6.1 Généralités du secteur

[tm27 Domestique]

Le secteur du verre pour gobeletterie est l'un des plus petits secteurs de l'industrie du verre, dans son ensemble, et il représente environ 4 % de la production totale. Ce secteur couvre la fabrication de vaisselle, d'articles de cuisine et d'objets décoratifs en verre, allant des verres à boire, aux tasses, aux assiettes, aux vases et aux articles de décoration. La fabrication de verre pour gobeletterie est très largement répandue, sur tout le territoire de l'UE, avec 140 installations

environ, dont une quarantaine atteignent le critère de production de 20 tonnes par jour, requis par la Directive 96/61/CE. Ces dernières représentent la plus grosse partie de la production de l'UE, dans ce secteur. La production totale dépassait légèrement 1 million de tonnes en 1997, avec un effectif d'environ 90 000 personnes, directement employées dans le secteur. La croissance, enregistrée par la production dans l'UE, entre 1986 et 1997, a été relativement faible et, certaines années, la production a également subi une baisse.

Les principaux fabricants de verre pour gobeletterie en Europe sont Bormioli-Rocco e Figlio, Italie, Calp, Italie, Schott, Allemagne, Durobor-Ravenhead, Belgique et Royaume Uni, Edinburgh Crystal, Royaume Uni, Nachtmann, Allemagne, Verrerie Cristallerie d'Arques Vca, France et Waterford Crystal, Irlande. Comme indiqué plus haut, il existe d'autres sociétés plus petites, souvent spécialisées dans des produits à haute valeur ajoutée, cristal au plomb, etc.

La répartition géographique du secteur et la taille des installations figurent au Tableau 1.10 et au Tableau 1.11.

Etat membre	Nombre d'installations	% de la Production de l'UE
France	15	44,5
Italie	14	17,5
Royaume Uni	16	10,7
Allemagne	35	9,8
Portugal	17	2,4
Grèce	1	1,3
Autriche	6	1,3
Espagne	inconnu	
Belgique	2	11,8
Danemark	1	
Irlande	>4	
Pays Bas	1	
Suède	15	0,7
Finlande	>4	
Total	>131	1 045 694 tonnes en 1997

**Tableau 1.10 : Nombre et répartition des installations de production de verre pour gobeletterie dans les Etats Membres en 1997**

Volume de la production Tonnes/jour	<20	20 à 50	50 à 100	100 à 200	>200
Nombre d'Installations dans chaque catégorie	>90	20	14	5	2

**Tableau 1.11 : Nombre d'installations de production de verre pour gobeletterie dans les différentes catégories de volume de production (estimation)**

## 1.6.2 Produits et Marchés

[tm27 Domestique]

Le secteur de la production de verre, pour gobeletterie, est très varié en termes de produits et de procédés de fabrication utilisés. Les produits vont des produits de consommation produits en masse, aux carafes et verres précieux, en cristal au plomb. Les procédés de formage des produits comprennent des techniques manuelles, tubes à souffler et découpage, et des machines

entièrement automatisées. Les produits de base sont décrits, dans le paragraphe précédent, les verres à boire représentant environ 50 % de la production.

Une grande partie des produits est à base de verre sodocalcique, transparent ou coloré. Le cristal au plomb 24% et le cristal sont utilisés pour la fabrication de verres, de carafes, et d'objets décoratifs, dotés d'une grande transparence et d'une densité élevée. L'opaline est utilisée pour la production de tasses, de plats, d'assiettes et de vaisselle pour le four. Le verre pour gobeletterie aux borosilicates est peut-être mieux connu sous le nom de certaines marques, telles que Arcuisine, Vca, Duran, Schott et Pyrex, Newell, et les principaux produits sont les casseroles et la vaisselle, résistantes à la chaleur. Dans certains cas, les produits fabriqués à partir de ces différentes compositions sont trempés, afin d'en augmenter la résistance aux chocs mécaniques et thermiques. Les produits en vitrocéramique sont utilisés pour des applications haute température, en particulier la vaisselle pour four, et peuvent résister à des chocs thermiques intenses.

Les clients finaux sont, bien sûr, extrêmement nombreux. Mais la majorité des ventes est destinée aux revendeurs en gros et au détail. Bien que certains producteurs vendent également directement au public. Différents facteurs influent sur ce marché. Les goûts des clients et l'évolution des comportements sociaux sont très importants. Par exemple, la tendance à prendre les repas de façon plus décontractée, surtout en Europe, a provoqué une forte demande d'articles moyens de gamme, plus économiques. Tandis que la demande de verre coloré varie dans le temps et selon les régions. Les fabricants doivent absolument suivre ces évolutions, en satisfaisant les exigences de la clientèle, par conséquent, la flexibilité est un élément essentiel, dans la gestion de la production.

Dans cette optique, la composition du verre, pour gobeletterie doit être spécifiquement conçue selon les produits et les exigences de traitement. Même les formules les plus répandues de verre sodocalcique peuvent présenter d'importantes différences, par rapport à d'autres types de verre sodocalcique, destinées au verre d'emballage ou au verre plat.

Une mécanisation accrue, dans la fabrication du verre au plomb, a mené à la production d'articles meilleur marché, de qualité similaire à celle des articles fabriqués main. Toutefois, ce genre de produits, à haute valeur ajoutée, est particulièrement sensible à la perception du client et les articles faits main se vendent toujours à un prix plus élevé. Ce qui signifie qu'il est improbable que les articles faits main se limitent, du moins à moyen terme, à des produits fabriqués uniquement sur commande.

### 1.6.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm27 Domestique]

Comme beaucoup d'autres secteurs de l'industrie du verre, celui du verre pour gobeletterie représente une activité bien implantée, dont la demande subit une modeste croissance à long terme. Les produits issus de ce secteur se transportent facilement et les exportations sont relativement importantes, aussi bien entre les Etats Membres, qu'entre les Etats Membres et les pays n'appartenant pas à l'Union Européenne. La principale menace pour ce secteur est une augmentation sensible des importations, sur les marchés nationaux, et une concurrence accrue, sur les principaux marchés à l'exportation. Ce dernier phénomène a provoqué une plus grande pression sur les prix et, par conséquent, une diminution de la rentabilité. En 1996, les exportations et les importations représentaient, respectivement 34 % et 17 %, de la production de l'UE, en termes de valeur. Bien que cela représente globalement une balance commerciale relativement équilibrée, la plupart des importations provenaient de la Turquie et de l'Europe Orientale. Deux zones géographiques où les exportations, en provenance de l'UE, étaient nettement inférieures aux importations, en provenance de ces pays.

Tout comme d'autres secteurs de l'industrie du verre, la fabrication du verre, pour gobeletterie en série, demande d'importants investissements à long terme. C'est la raison pour laquelle le



nombre de producteurs de verre pour gobeletterie, qui dépassent les 20 tonnes par jour est limité. Bien que ces quelques entreprises fabriquent une grande partie de la production de l'UE, le secteur du verre pour gobeletterie présente une particularité, un grand nombre de petites installations, qui nécessitent moins d'investissements, souvent spécialisées dans des articles faits main, à haute valeur ajoutée, ou dans des segments très spécifiques du marché. Ces petites quantités de verre peuvent être produites dans des fours à pots et des fours journaliers, dont la construction et le fonctionnement sont relativement bon marché. Mais qui ne pourraient jamais être compétitifs, sur des marchés à gros volumes.

Le secteur du verre pour gobeletterie utilise des fours de tailles et de types très différents, le délai entre deux réparations de four variant en conséquence. Les grands fours, à combustible fossile, fonctionneront pendant une période de 5 à 8 ans, avant d'avoir besoin des réparations importantes. Tandis que le délai, pour les fours électriques, sera compris entre 3 et 6 ans et pour les fours à pot entre 10 et 20 ans, les pots étant remplacés tous les 3 à 12 mois. Pour un four électrique moyen, destiné à la production de verre au plomb, d'une capacité journalière de 30 tonnes, une grosse réparation, à l'exception des machines de formage, coûtera autour de 2 millions d'euros. Tandis qu'un nouveau four peut coûter environ 8 millions d'euros. Pour un four moyen, à combustible fossile, pour verre sodocalcique, avec une capacité de 130 tonnes /jour, une réparation importante, à l'exception des machines de formage, se situera autour de 4 millions d'euros. Tandis que l'achat d'un nouveau four pourra coûter 12 millions d'euros.

#### 1.6.4 Principaux problèmes environnementaux

En général, les matières premières utilisées, dans la production de verre pour gobeletterie, sont des substances naturelles ou artificielles relativement peu nocives. L'exception est la production de cristal au plomb 24% ou de cristal, qui utilise l'oxyde de plomb et, parfois le trioxyde d'antimoine ou d'arsenic, qui requiert que l'on adopte certaines précautions, pour leur manipulation et leur stockage, afin d'éviter les émissions. Ce secteur produit une quantité relativement faible de déchets solides et la plupart des calcins, générés par le procédé de production, sont recyclés dans celui-ci. Lorsque le recyclage interne est impossible, les calcins sont habituellement récupérés ou recyclés, dans le secteur du verre d'emballage, sauf le cristal au plomb 24% et le cristal. Si les conditions requises, en matière de qualité le permettent. Justement, ces dernières empêchent, généralement, l'utilisation de calcins extérieurs, dans le procédé de fabrication.

La plupart des types de verre pour gobeletterie ne présentent pas de risques majeurs d'émissions aqueuses. L'eau est principalement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement et peut être facilement retraitée ou réutilisée. Toutefois, l'utilisation de composés plus toxiques, dans la production du cristal au plomb 24% ou du cristal, comporte un risque potentiel d'émissions plus important. Les émissions peuvent être réduites et le niveau de pollution résiduelle peut être traité, par des techniques standard.

Le principal problème environnemental, lié à la production de verre pour gobeletterie, est qu'il s'agit d'une activité à haute température et à forte consommation d'énergie. Pour les fours à combustible fossile, cela provoque l'émission du produit de la combustion et l'oxydation à haute température de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles présentes, dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, de fluorures et de métaux, présents sous forme de scories, dans les matières premières. L'opaline nécessite l'emploi de matières premières contenant des fluorures, pouvant provoquer des émissions de fluorure d'hydrogène. Le polissage à l'acide, lorsqu'il est pratiqué, implique des problèmes d'émissions atmosphériques, aqueuses et la production de déchets solides.

Des solutions techniques sont disponibles, pour réduire les niveaux d'émission. Chaque technique ayant toutefois, différentes implications techniques et financières. D'importants

progrès ont été réalisés dans ce secteur du point de vue environnemental. Les émissions ont été réduites de manière considérable, ainsi que la consommation d'énergie.

## 1.7 Verres spéciaux

### 1.7.1 Généralités du secteur

[tm25 Spécial, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le secteur des verres spéciaux représente environ 6 %, de la production de verre dans son ensemble, en termes de tonnage. Il représente le quatrième secteur par ordre d'importance. Les produits en verre spécial possèdent une valeur ajoutée relativement élevée. La valeur de la production brute, en 1996, se situait autour de 3 milliards d'euros. Ce qui équivaut à environ la moitié du chiffre, réalisé par le secteur le plus important, celui du verre d'emballage. En 1997, ce secteur a produit 1,46 millions de tonnes d'articles, en incluant les verres à boire, avec un effectif de 35 000 personnes environ employées directement.

Il s'agit là d'un secteur extrêmement diversifié, couvrant une grande variété d'articles. Les principaux produits étant toutefois, les tubes cathodiques, CRT, les téléviseurs et écrans, l'éclairage, tubes et ampoules, les produits optiques, les articles en verre pour laboratoires, le verre au borosilicate et vitrocéramique, vaisselle et applications domestiques haute température, l'industrie électronique, par exemple les écrans LCD. Certaines activités de production, liées au secteur des verres spéciaux, recoupent d'autres activités et secteurs de l'industrie du verre, en particulier le verre pour gobeletterie, pour certains produits à base de borosilicates et de vitrocéramique. Toutefois, cela ne constitue pas un grave problème. Car ce type de produits représente seulement une petite partie de la production du secteur.

La production journalière de la majorité des petits producteurs de produits spéciaux, à faible volume, tels que le verre pour l'industrie optique et pour l'électronique, n'atteint pas 20 tonnes, niveau minimum indiqué dans la Directive 96/61/CE. La plupart des usines de production de verre, pour tubes cathodiques et pour éclairage, de verre au borosilicate et de vitrocéramique, sont au-dessus de cette limite. Certaines installations intégrées produisent une large gamme de produits en gros et faibles volumes et dans ce cas, la production totale peut dépasser ce niveau.

Bien qu'on le considère souvent comme un produit de l'industrie chimique, le silicate de sodium peut être produit par du sable de fusion et du carbonate de sodium. Cette activité correspond aux définitions figurant aux Paragraphes 3.3 et 3.4 de l'Annexe 1 de la Directive 96/61/CE. Aux fins du présent document, cette activité a été considérée comme faisant partie du secteur des verres spéciaux. Bien que certaines distinctions aient été établies, dans certains cas.

### 1.7.2 Produits et Marchés

[tm25 Spécial]

Le Tableau 1.12 montre la production relative à chaque partie du secteur. Le verre pour tubes cathodiques et écrans, ainsi que les tubes et les ampoules en verre, représentent plus de 80 % de la capacité.

Type de verre	Production 1997 tonnes	Capacité tonnes par an	% capacité du secteur sauf silicate de sodium
Verre pour tubes cathodiques et écrans de télé	525 000	880 000	61,2
Tubes et ampoules	240 000	290 000	20,2
Verre au borosilicate , sauf tubes	60 000	90 000	6,3
Autres verres pour éclairage sauf quartz, tubes et ampoules	30 000	60 000	4,2

Vitrocéramique	25 000	65 000	4,5
verre au quartz	5 000	15 000	1,0
verre pour produits optiques	6 000	12 000	0,8
autres types de verre	10 000	25 000	1,8
Total verres spéciaux	901 000	1 437 000	100
Silicate de sodium	560 000	600 000	42 % des verres spéciaux
Total global	1 461 000	2 037 000	142

**Tableau 1.12 : Répartition du secteur des verres spéciaux**

Dans l'UE, le verre pour téléviseurs est produit uniquement en Allemagne, au Royaume Uni et en France. La production est contrôlée par cinq entreprises, Philips, usines en Allemagne et au Royaume Uni, Schott, Allemagne, Samsung-Corning, Allemagne, Nippon Electrical Glass, NEG, Royaume Uni et Thomson Videoglass, France. 13 fours sont actifs sur le territoire de l'UE, avec une production allant de 70 à 360 tonnes/jour, et une capacité moyenne de 185 tonnes/jour. La majorité des fours sont des fours régénératifs, à brûleurs transversaux. Mais on trouve également quelques fours à oxycombustion. Ces produits sont exportés et les marchés sont fortement régionalisés. Par exemple, en Europe, le nombre de micro-ordinateurs à usage personnel, a beaucoup augmenté, provoquant une forte demande d'écrans. Alors que la croissance, dans la production de téléviseurs, est beaucoup plus lente, à l'exception de certains pays en voie de développement.

La production de tubes, pour applications pharmaceutiques et pour l'éclairage, et de verre pour ampoules est largement répandue sur le territoire de l'UE. Mais sa plus forte concentration est en Allemagne, aux Pays Bas et au Royaume Uni. 10 entreprises produisent ce type de produits Schott, Osram et Techn, Glaswerke Ilmenau, Allemagne, Philips, Pays Bas, Demaglass, Royaume Uni, Kimble Italiana et Bormioli Rocco E Figlio, Italie, Wheaton Lawson Mardon, France, Averti, Espagne et Glass Componenten Lommel, Belgique.

La taille des fours varie entre 20 et 200 tonnes/jour, pour les verres sodocalciques, de 20 à 50 tonnes/jour, pour le verre au borosilicate. Les fours pour la production du verre sodocalcique sont généralement des fours régénératifs, à brûleurs transversaux. Tandis que ceux pour la production de verre au borosilicate sont généralement électriques, avec quelques fours à récupération. Le verre destiné à l'éclairage est en grande partie produit par les fabricants d'éclairages eux-mêmes. Les autres types de verre pour éclairages sont principalement destinés à la fabrication de lampes, pour applications techniques, ou pour l'industrie automobile et représentent environ 4 % de la production de verres spéciaux.

La production de verre au borosilicate, à l'exception des tubes et de l'éclairage, est surtout concentrée en Allemagne, Schott, Desag, Jenaer et Techn, Glaswerke Ilmenau, en France, Verrerie Cristallerie d'Arques et au Royaume Uni, Corning. La capacité de fusion peut varier entre 20 et 50 tonnes/jour, et les fours utilisés sont principalement électriques, avec un certain nombre de fours à récupération. Parmi les produits on trouve la vaisselle, les articles de laboratoire, le verre ignifugé, pour portes et fenêtres, les petits panneaux de verre, résistant au feu, pour les portes des fours, etc. Dans ce secteur, les produits en vitrocéramique sont fabriqués principalement par Schott Glas en Allemagne et Keraglass et Eurokera en France. Il s'agit principalement de vaisselle et de casseroles, résistantes aux hautes températures, par exemple Jena 2000 et Pyroflam, et de plaques de cuisinière, en verre plat céramique.

Le silicate de sodium est fabriqué en Allemagne, Henkel KG, APS-Akzo et Woellner Silicat, au Royaume Uni, ICI/Crossfield Chemicals, aux Pays Bas, Akzo-PQ Silica Vof, en France, Rhône-Poulenc - Rhodia, en Finlande, Zeofinn Oy, et en Espagne, FMC forest. Le leader du marché est Henkel KG. La capacité des fours varie entre < 40 et 350 t/jour. Il s'agit principalement de fours régénératifs, à brûleurs transversaux. Mais l'un des producteurs utilise des fours à rotation. Le silicate de sodium est également fabriqué avec un procédé hydrothermique qui ne rentre pas

dans les définitions données aux paragraphes 3.3 et 3.4 de l'Annexe 1, de la Directive 96/61/CE et nous n'en avons pas traité dans ce document. Environ 20 à 30 % du silicate de sodium, produit dans l'UE, est fabriqué par le procédé hydrothermique.

Le Tableau 1.13 montre la répartition de la production dans les Etats Membres. Mais ces données ne sont disponibles que pour le verre pour téléviseurs et les tubes/ampoules en verre, qui représentaient 85 % de la production en 1997.

Etat Membre	Verre pour téléviseurs		Tubes/ampoules en verre	
	Nb Installations	% Production UE	Nb. Installations	% Production UE
Allemagne	3	69	3	40
RU	2	21	1	15
France	1	10	1	Cf. autres
Pays Bas/Belgique	-	-	2	32
Autres	-	-	3	13

**Tableau 1.13 : Répartition de la production de verres spéciaux dans l'UE**

### 1.7.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm25 Spécial, statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Les sous-secteurs, de production de verres spéciaux comprennent, à la fois des activités dont l'évolution est actuellement stabilisée, et des activités destinées à des marchés en plein essor. Certaines entreprises travaillent pour des marchés extrêmement divers. La croissance, les bénéfices et la structure générale peuvent beaucoup varier d'une partie du secteur à l'autre. Par exemple, en 1996, la production de verre pour tubes cathodiques, destinée aux écrans d'ordinateurs, a enregistré une croissance spectaculaire en Europe. Tandis que la demande de verre, destiné au marché optique en Europe, stagnait suite à la concurrence exercée par d'autres matériaux. La croissance globale du secteur, entre 1986 et 1996, était stable, la production étant passée de 1,75 à 2,76 milliards d'euros.

En 1996, les exportations de verres spéciaux, en provenance de l'UE, en dehors du silicate de sodium, atteignaient 68 500 tonnes, et les importations 87 500 tonnes. Ce qui représentait un déficit significatif de la balance commerciale. Les importations provenaient principalement du Japon, plus de 40 %, pour une plus faible part, de l'Europe de l'Est, 22 %, et des Etats Unis, 12 %.

La fabrication de verre à grande échelle demande des investissements importants à long terme. C'est la raison pour laquelle le nombre de producteurs de verres spéciaux, dépassant les 20 tonnes par jour, est limité. Bien que la majorité des verres spéciaux soit produite par ces quelques entreprises, ce secteur compte également de plus petites structures, dotées d'installations à plus faibles investissements, souvent spécialisées dans des produits à haute valeur ajoutée, de grande qualité et très avancés sur le plan technique.

Ces petites quantités de verre sont fabriquées dans de petits fours, souvent électriques, fonctionnant pendant des périodes moins longues. Malgré leur échelle plus réduite, ces installations demandent des investissements à long terme considérables, pour l'acquisition d'équipements de haut niveau, l'embauche de personnel qualifié et le financement d'activités complexes de recherche et développement.

Le secteur des verres spéciaux utilise une grande variété de fours et le délai entre deux réparations varie en fonction du type de four concerné. Les grands fours, à combustible fossile, peuvent fonctionner pendant 6 à 7 ans, pour le verre spécial, et pendant 8 à 12 ans pour le silicate de sodium, avant que des réparations importantes soient nécessaires. En ce qui concerne les fours électriques, le délai entre deux réfections de fours est de 3 à 4 ans. Etant donné les

grandes différences qu'on rencontre dans ce secteur, les coûts moyens sont difficiles à prévoir. Les coûts figurant dans le tableau ci-dessous nous ont été fournis par les industries du secteur, pour des unités de production type.

Unité de Production	Capacité	Production	Investissement total
Vaisselle au borosilicate, verre pour articles de laboratoire etc.	1 four 35 à 40 t/jour	En moyenne, 26 millions de pièces par an	25 millions d'euros
Tubes cathodiques et écrans de télévision. Lignes de formage : 3 pour les écrans, 2 pour les tubes.	1 four pour écrans 200 à 300 t/jour 1 four pour tubes 140 à 200 t/jour	6 à 10 millions de jeux par an.	300 à 400 millions d'euros
Dessus de four en vitrocéramique	2 fours x 60 t/jour.	800 000 m <sup>2</sup> , 3 millions de pièces.	175 millions d'euros
Tubes de verre, fusion et traction.	2 fours x 30 à 35 t/jour	16 000 tonnes nettes.	30 millions d'euros

**Tableau 1.14 : Investissements nécessaires pour les installations destinées à la production de verres spéciaux**

#### 1.7.4 Principaux problèmes environnementaux

La variété et la spécificité des produits fabriqués, par le secteur des verres spéciaux, impliquent l'utilisation d'un grand nombre de matières premières, par rapport à la plupart d'autres secteurs. Par exemple, les tubes cathodiques contiennent un pourcentage d'oxyde de plomb de plus de 20 %, comparable à celui du verre au plomb. Certaines compositions requièrent l'emploi d'agents de finition spéciaux, tels que les oxydes d'arsenic et d'antimoine. Tandis que certains verres optiques peuvent contenir jusqu'à 35 % de fluorures et 10 % d'oxyde d'arsenic.

Ce secteur génère des quantités relativement faibles de déchets solides et la majorité des calcins, produits par le procédé sont recyclés. Des considérations d'ordre qualitatif ont limité l'emploi des calcins extérieur et de la consommation. Des initiatives ont été prises, afin de promouvoir la standardisation de la composition du verre, de tubes cathodiques, pour faciliter le recyclage à l'avenir. L'eau est beaucoup utilisée, pour le nettoyage et le refroidissement, et peut être rapidement retraitée et réutilisée. La production de verres spéciaux peut provoquer une pollution de l'eau, à cause des opérations de polissage, en particulier pour les verres à base de plomb. Les émissions peuvent être réduites par l'utilisation de techniques appropriées de manipulation et la limitation des déversements accidentels. Les niveaux d'émissions résiduelles peuvent être traités par des techniques standard.

Le principal problème, lié à l'utilisation de fours à combustible fossile, est la température élevée et la forte consommation d'énergie qu'implique ce procédé. Cela provoque l'émission du produit de la combustion et l'oxydation à haute température de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles, présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, de fluorures et de métaux, présents sous forme de scories, dans les matières premières. Lorsque le procédé nécessite l'emploi de matières premières, contenant des fluorures, cela peut provoquer des émissions de fluorure d'hydrogène. La présence, dans la composition, de produits toxiques peut provoquer des émissions dues à la manipulation, au stockage et au four. Dans ce cas, des mesures appropriées devront être adoptées. Des solutions techniques sont disponibles, pour réduire les niveaux d'émission, chaque technique ayant, toutefois, différentes implications techniques et financières. D'importants progrès environnementaux ont été réalisés, dans ce

secteur. Les émissions ont été réduites de manière considérable, ainsi que la consommation d'énergie, par l'application à la fois, de mesures primaires et secondaires.

## 1.8 Laine minérale

### 1.8.1 Généralités du secteur

[tm26 EURIMA, statistiques EURIMA]

Le secteur de la laine minérale représente environ 6 à 7 % de la production totale de l'industrie du verre. Ce secteur concerne la production de laine de verre et de laine de pierre pour isolation, essentiellement en masses de fibres de différentes longueurs entrelacées de manière aléatoire et agglomérées, à l'aide d'un agglomérant à base de résine. Bien que le terme fibre de verre soit parfois utilisé pour indiquer la laine de pierre, les produits pour isolation ne doivent, en aucun cas, être confondus avec les produits issus du secteur des fibres de verre à fil continu, fabriqués à partir de procédés différents et commercialisés sur des marchés à part.

En 1996, ce secteur employait directement plus de 10 000 personnes, dans ses 48 installations, avec une production de 2 millions de tonnes de produits, pour une valeur avoisinant les 2 milliards d'Euros. Entre 1986 et 1996, la production a subi une lente augmentation, passant de 1,4 millions de tonnes à 2 millions de tonnes. Le marché est dominé par cinq entreprises dans l'UE, Saint-Gobain, 20 installations dans 12 Etats Membres, Rockwool International, 10 installations dans 5 Etats Membres, Partek Insulation, 6 installations dans 2 Etats Membres, Pfleiderer, 3 installations dans 2 Etats Membres, et Owens Corning, 4 installations dans 2 Etats Membres. La plupart de ces entreprises possèdent également des usines dans des pays tiers ou dans d'autres secteurs. Il existe également un certain nombre de fabricants indépendants, dans l'UE. Le Tableau 1.15 et le Tableau 1.16. montrent la répartition géographique de la production de laine minérale et la taille des entreprises, par volume de production.

État membre	Nombre d'installations	% Production 1996
Autriche	2	3,5
Belgique	2	4,5
Danemark	4	9,0
Finlande	5	7,5
France	7	16,0
Allemagne	9	28,0
Grèce	1	Env. 0,5
Portugal	1	
Italie	2	2,0
Pays Bas	2	9,5
Espagne	2	3,0
Suède	5	7,0
Royaume Uni et Irlande	6	9,5
Total	48	2 000 000 tonnes

**Tableau 1.15 : Nombre d'usines de production de laine minérale dans les Etats Membres**

Le Tableau 1.16 montre le nombre d'installations de production existantes en 1996, par catégorie de volume de production. Un certain nombre de ces installations possèdent plus d'une usine. Ces chiffres représentent la production réelle, en 1996 et on estime que la plupart de ces installations travaillaient, à l'époque entre 10 % et 30 %, en dessous de leur pleine capacité. La production moyenne par installation, en 1996, se situait autour de 41 000 tonnes. Il convient d'observer que ces chiffres concernent le tonnage et une application donnée, la laine de pierre étant considérablement plus dense que la laine de verre, en particulier en ce qui concerne les plus faibles densités.

Volume de					
-----------	--	--	--	--	--



production Tonnes/jour	<27	27 à 82	82 à 164	164 à 274	>274
Nombre d'Installations dans chaque catégorie	5	16	16	9	2

**Tableau 1.16 : Nombre d'installations de production de laine minérale dans les différentes catégories de volume de production**

## 1.8.2 Produits et Marchés

[tm26 EURIMA]

La laine minérale a été produite, pour la première fois, en 1864. La méthode consistait à l'époque, en l'application d'un jet de vapeur sur des scories en fusion, sorties d'un haut fourneau. Des brevets furent déposés et la production commença autour de 1870. Ce marché commença à s'élargir de manière considérable, au cours de la deuxième guerre mondiale, en raison de la forte demande d'habitations préfabriquées bon marché, pour remplacer les habitations détruites. En 1943, rien qu'aux Etats Unis, la production de laine minérale dépassait déjà 500 000 tonnes. Dans la majorité des pays développés, l'isolation thermique est devenue tout à fait courante et fait partie de la structure de la plupart des bâtiments. En plus de ses propriétés thermiques, l'isolation à base de laine minérale, possède d'excellentes propriétés acoustiques et ignifuges. Parmi les principaux produits figurent les isolants, en rouleau basse densité, les panneaux isolants moyenne et haute densité, la laine en vrac, pour le soufflage et les isolants pour tubes. Les principaux marchés, pour ce type de produits, sont les isolants thermiques, pour le bâtiment, murs, toits, sols etc., le chauffage et la ventilation, les équipements industriels, techniques, tuyauteries industrielles, récipients, usines chimiques, offshore et maritime, la protection contre les incendies, acoustique, l'isolation acoustique et l'insonorisation, les matériaux inertes et l'amélioration des sols. Bien que la laine de verre et la laine de pierre soient interchangeable, dans un grand nombre d'applications, certaines d'entre elles requièrent l'utilisation de l'un des deux produits en particulier. La laine de pierre est souvent privilégiée, dans toutes les applications comportant de hautes températures ou dans la protection contre les incendies. Tandis que la laine de verre est fréquemment employée, lorsque la légèreté est une qualité essentielle.

Le principal marché pour la laine minérale est celui du bâtiment, qui absorbe jusqu'à 70 % de la production et dépend en grande partie de la conjoncture économique générale. En dehors de certaines exceptions, la croissance du secteur du bâtiment, dans l'UE, au cours des années 90 a été particulièrement lente, avec des périodes cycliques de récession, variant d'une zone géographique à l'autre. Parmi les autres facteurs qui se répercutent de manière significative sur ce marché, figurent les conditions météorologiques et climatiques, le coût du carburant, y compris les taxes sur celui-ci, la législation, surtout les normes sur la construction, et la pression pour l'amélioration de protection environnementale mondiale, réchauffement et pollution de la planète.

Malgré l'expertise technique requise pour la fabrication d'isolants en fibres de verre, la laine minérale est essentiellement un produit de consommation. Il est difficile de pouvoir diversifier les produits sur les mêmes marchés et la concurrence est essentiellement basée sur le prix, ce qui a mené à une sensible diminution des coûts et à des compressions de personnel, dans le secteur. La concurrence est moins intense, dans cette partie du marché, consacrée aux produits "techniques", où la demande concerne des articles à haute valeur ajoutée, tels que des segments de tubes rigides, pour applications à haute température résistantes au feu.

Etant donné les températures peu élevées requises dans le secteur du bâtiment, une grande variété de matériaux isolants alternatifs est disponible. Les plus courants sont les mousses plastiques, principal concurrent, les fibres de cellulose, papier journal broyé, la vermiculite et la

perlite et le verre cellulaire. Aucun de ces matériaux ne peut fournir des performances comparables à celles de la laine minérale, dans tous les domaines, bas prix, performances thermiques, performances acoustiques, résistance au feu et facilité d'installation. Mais chacun trouve sa place sur le marché.

### 1.8.3 Aspects commerciaux et financiers

[tm26 EURIMA, tm8 S2 3.03]

Le secteur de la laine minérale constitue une activité extrêmement stable, à faible croissance, fortement concurrentielle. Ce marché présente une surcapacité considérable, malgré la fermeture de nombreuses usines, et ce phénomène, associé à une faible croissance, a provoqué une importante pression sur les prix. Le prix de vente d'une tonne de produit, en 1997, était le même qu'en 1987, et, par conséquent, considérablement moins élevé en valeur constante. Les produits à base de laine minérale présentent un faible rapport valeur/volume, qui limite la distance sur laquelle ils peuvent être transportés de façon économique. Malgré cet aspect, le commerce est relativement actif entre les pays de l'UE. Tandis que les exportations, en dehors de l'UE, ne représentent que 5 % de la production totale. Concrètement, le commerce hors UE est plus important lorsque les Etats Membres sont frontaliers avec des pays hors UE. Les exportations en provenance de Suède et de Finlande et destinées à la Pologne, Russie et aux Républiques Baltes, sont plus actives, tout comme les importations en provenance de Hongrie, Slovaquie et de Croatie vers l'Allemagne, l'Autriche et l'Italie.

La production de laine minérale est une activité qui demande beaucoup d'investissements à long terme et des moyens financiers considérables et de grandes compétences techniques. Ceci constitue une importante barrière à l'entrée des entreprises sur ce marché et la plupart des fabricants sont de grandes entreprises, qui travaillent dans ce secteur depuis longtemps. Les fabricants indépendants sont de plus en plus souvent absorbés par les grands groupes.

Le secteur de production de la laine de verre utilise principalement des fours électriques et des fours à récupération et, dans une moindre mesure, des fours oxycombustion, pour la fabrication de laine de verre. Des cubilots à vent chaud sont essentiellement utilisés pour la production de laine de pierre. Le délai entre deux réparations de four varie en fonction du type de four employé. Les fours à récupération peuvent fonctionner pendant 8 à 12 ans, avant de nécessiter des réparations importantes. Pour les fours électriques, le délai est de 3 à 6 ans. La durée de vie des fours oxycombustion n'a pas encore été établie avec précision. Mais elle devrait être comparable à celle des fours à récupération. Les cubilots à vent chaud ne peuvent pas fonctionner sans interruption, pendant d'aussi longues périodes. Le délai entre deux interruptions est généralement, de 1 à 3 semaines. Dans un secteur aussi stable, les nouvelles créations d'entreprises sont rares. Toutefois, une usine dotée d'une capacité de production de laine de verre de 20 000 tonnes/an, a été créée en 1998, avec un investissement de 45 millions d'euros. L'investissement pour la création d'une usine de production de laine de pierre, dotée d'une capacité un peu plus élevée, environ 40 000 tonnes /an, représenterait un investissement similaire. Les coûts de réfection des fours sont comparables à ceux indiqués pour les autres secteurs.

### 1.8.4 Principaux problèmes environnementaux

La production de laine minérale a deux éléments en commun, avec les autres secteurs de l'industrie du verre, les hautes températures et la forte consommation d'énergie. Les fours, à combustible fossile, provoquent l'émission des produits de la combustion et l'oxydation à haute température de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières, générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles, présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, de fluorures et de métaux présents sous forme de scories dans les matières premières.

Ce secteur a également deux autres sources importantes d'émission, les opérations de formage, application de l'agglomérant sur les fibres, et le traitement thermique, séchage du produit et traitement thermique de l'agglomérant. Les émissions provenant des opérations de formage peuvent contenir d'importantes quantités de particules, de phénol, de formaldéhyde, d'ammoniaque et d'eau. Les émissions, provenant du traitement thermique, contiennent des composants volatiles d'agglomérant, des substances générées par la décomposition de l'agglomérant, ainsi que des produits de la combustion, provenant des brûleurs des fours. Des solutions techniques sont disponibles, pour réduire les niveaux d'émission, chaque technique ayant, toutefois, différentes implications techniques et financières. D'importants progrès environnementaux ont été réalisés dans ce secteur. Les émissions ont été réduites de manière considérable, ainsi que la consommation d'énergie.

En général, la production d'isolants, à base de laine minérale, ne présente pas de risques majeurs d'émissions aqueuses. Les procédés de base consomment une quantité considérable d'eau, provenant, en particulier, de l'évaporation produite par les opérations de formage et par le traitement thermique. Les circuits des eaux de production sont généralement fermés. Mais il convient d'adopter certaines précautions, pour éviter la pollution du circuit de l'eau propre. Les émissions peuvent être réduites, par l'application de techniques appropriées, dans la manipulation, visant, en particulier, à limiter les déversements accidentels. La pollution résiduelle peut être traitée par des techniques standard

Dans l'analyse de l'impact global de ce secteur sur l'environnement, il convient de tenir compte des avantages en termes de protection environnementale, associés aux produits de ce secteur. La consommation d'énergie, dans la fabrication de laine minérale, est relativement faible, par rapport aux économies potentielles qu'on peut réaliser, au cours de l'utilisation de ces produits. En moins d'un mois, après leur installation, les produits isolants à base de laine minérale, peuvent aider à économiser la quantité totale d'énergie, consommée pour leur fabrication. Au bout de 50 ans d'utilisation, ce qui est commun pour les bâtiments, la quantité d'énergie économisée peut être 1 000 fois supérieure à celle consommée pendant la phase de production. Si on prend en compte les émissions moyennes de CO<sub>2</sub>, produites par la génération d'énergie par combustible fossile, au bout de 50 ans d'utilisation, un produit peut également économiser 1 000 fois la quantité de CO<sub>2</sub> émise pendant sa production. A des températures élevées, par exemple à l'intérieur de tuyaux, de chaudières ou d'installations de production, les économies peuvent être encore plus significatives et le retour sur investissement pour l'environnement, peut être calculé en jours plutôt qu'en semaines

## 1.9 Fibres céramiques

### 1.9.1 Généralités du secteur

[tm40 ECFIA]

Six usines sont actuellement en activité, dans ce secteur dans l'UE, avec un effectif d'environ 800 personnes. La production a été estimée, en 1997, à environ 42 000 tonnes, 0,15 % de la production totale de l'industrie du verre. Les deux principaux pays producteurs étant le Royaume Uni et la France. Trois entreprises seulement sont présentes, dans ce secteur dans l'UE, Thermal Ceramics, 3 usines, Carborundum, entreprise du groupe Saint-Gobain, 2 usines et Rath, 1 usine. Dans le présent document, nous avons pris en compte uniquement la production de fibres céramiques, par fusion de substances minérales. Certaines fibres, à savoir les fibres cristallines d'alumine, peuvent être produites par des moyens chimiques. Mais ces activités ne rentrent pas dans les définitions, données aux paragraphes 3.3 ou 3.4 de l'Annexe 1 à la Directive 96/61/CE.

État membre	Nombre d'installations
France	2
Allemagne	1
Italie	1

Royaume Uni	2
<b>Total</b>	<b>6</b>

**Tableau 1.17 : Répartition des usines de production de fibres céramiques parmi les Etats Membres**

### **1.9.2 Produits et Marchés**

[tm40 ECFIA]

Les fibres céramiques sont un matériau vitreux, siliceux, et fibreux principalement employé en tant que matériau isolant haute température, entre 1 000 et 1 460°C. Ses principaux domaines d'application et ses parts de marché sont les revêtements internes de fours et de chaudières, 50 %, les appareils ménagers, 20 %, la transformation des métaux, 10 %, l'isolation industrielle générale, 10 %, l'industrie automobile, 5 %, la protection contre les incendies, 5 %. Le produit peut se présenter en général sous les formes de fibres en vrac, matelas, feutre ou modules, carton, papier, articles moulés sous vide et textiles. Toutes ces différentes formes sont créées à partir de fibres en vrac.

Un grand nombre de ces produits sont destinés à l'industrie lourde traditionnelle, comme l'industrie pétrolière, pétrochimique, sidérurgique, la fabrication de la céramique, du verre, la transformation de métaux non ferreux, la cimenterie etc. Les produits à base de fibres céramiques ont une valeur ajoutée relativement élevée et peuvent être transportés vers la plupart des marchés mondiaux, à des coûts acceptables. Ces produits sont souvent transformés ou incorporés dans d'autres produits, tels que les pots catalytiques, les joints d'échappement, les garnitures de piston, les boucliers thermiques et les garnitures de freins. Environ 30 à 40 % des principaux produits sont utilisés en tant que composants, dans des applications secondaires.

### **1.9.3 Considérations d'ordre commercial**

[tm40 ECFIA]

Le fait que seules trois entreprises produisent des fibres céramiques, dans l'UE à l'heure actuelle, est dû à un regroupement dans le secteur. L'achat de Carborundum par Saint-Gobain et sa fusion avec la holding déjà existante Kerlane, constituent deux événements très importants, pour le secteur. Les principaux facteurs, qui affectent cette activité, sont les coûts de production, énergie, matières premières et main d'œuvre, et l'activité des entreprises clientes. Les exportations de l'UE sont relativement significatives. Tandis que les importations restent plutôt limitées.

Le coût d'une nouvelle usine, de capacité moyenne, est estimé entre 3 et 8 millions d'euros. Les fours, de type électrique, ont une durée de vie comprise entre 3 et 5 ans. Tandis que les coûts relatifs aux fours sont estimés entre 1 et 2 millions d'euros.

Sur le marché des revêtements réfractaires, les fibres céramiques sont directement en concurrence avec d'autres matériaux réfractaires, tels que les briques. Dans d'autres domaines d'application, la concurrence est plutôt représentée par la laine minérale et par toute une série de fibres spéciales de silicium et d'alumine. Les produits en laine de verre et de pierre sont nettement moins chers que ceux à base de fibres céramiques, mais moins durables. Alors que les produits à base de fibres spéciales sont décidément plus coûteux. Grâce aux propriétés thermiques et physiques supérieures des fibres céramiques, la concurrence provenant d'autres produits de remplacement n'est pas véritablement dangereuse pour ce secteur.

### 1.9.4 Principaux problèmes environnementaux

Contrairement aux autres secteurs de l'industrie du verre, le secteur des fibres céramiques utilise exclusivement des fours électriques. Par conséquent, les émissions directement générées par les fours sont extrêmement faibles et peuvent être rapidement contrôlées. Le principal risque pour l'environnement est l'émission atmosphérique de particules, qui peuvent contenir des fibres. Selon la définition figurant dans la Directive sur les Matières Dangereuses 67/548/CEE, les fibres céramiques ont été récemment classées parmi les substances cancérigènes de catégorie 2. Pour cette raison, les émissions de fibres, sur le lieu de travail et dans l'environnement, doivent être soumises à un contrôle très strict. En général la quantité de déchets solides est relativement faible, de petites quantités d'émission liquides, contenant des solides en suspension et certains composés organiques peuvent être générées par les procédés secondaires. Le niveau des émissions, générées par les fibres céramiques produites dans les usines de l'UE, est extrêmement faible. Car ces installations sont équipées de systèmes de réduction des poussières lorsque c'est nécessaire.

## 1.10 Frittes

### 1.10.1 Généralités du secteur

[tm46 ANFFECC]

Bien que le secteur des frittes soit généralement associé à l'industrie céramique, il rentre dans l'objet du présent document. Car il relève de la définition figurant au paragraphe 3.4, de l'Annexe 1 de la Directive 96/61/CE. La production de l'UE est estimée entre 1 et 1,25 millions de tonnes /an. Ce qui fait de la production des frittes, l'un des plus petits secteurs de l'industrie du verre. L'effectif employé par ce secteur est difficile à établir avec précision. Car pour de nombreuses entreprises, ce type de production représente seulement une part marginale de l'activité. Ce secteur couvre la production de frittes destinées aux vernis et aux émaux, utilisés pour la décoration des céramiques et des métaux.

Environ 60 installations sont présentes dans l'UE, surtout en Espagne et en Italie. L'Espagne est le plus gros producteur mondial et sa production représente environ la moitié de la production totale de l'UE. L'Italie possède un plus grand nombre d'usines. Mais sa production est inférieure d'un point de vue quantitatif. Les trois principaux fabricants de l'UE sont Cerdec, Ferro et Cookson Matthey. Ces trois entreprises possèdent un grand nombre de filiales. Mais il existe également un certain nombre de producteurs indépendants, tels que Colorobbia en Espagne.

Etat membre	Nombre d'installations
Espagne	17
Italie	32(estimation)
Portugal	1
Belgique	1
Allemagne	4
Pays Bas	1
Royaume Uni	4
<b>Total</b>	<b>60(estimation)</b>

**Tableau 1.18 : Répartition des usines de production de frittes dans les Etats Membres (estimation)**

Volume de production Tonnes/jour	<80	80 à 150	>150
Nombre d'installations dans chaque catégorie	>14	>5	>5

**Tableau 1.19 : Nombre d'installations de production des frites par catégorie de volume de production (estimation)**

**Note : aucune information n'est disponible, concernant la taille des installations en Italie.**

### 1.10.2 Produits et Marchés

[tm46 ANFFECC, tm8 S23.03]

Le principal domaine d'application des frites de verre est la fabrication d'émaux, pour céramique et de pigments. Ces émaux, appliqués et fixés sur la surface d'objets en céramique, tels que des tuiles ou de la vaisselle, constituent un revêtement imperméable, décoratif et de protection. Les frites peuvent être vendues pures, aux fabricants de céramiques, qui créent leurs propres revêtements. Dans d'autres cas, les fabricants de frites peuvent eux-mêmes produire et fournir les revêtements. Généralement, plus de la moitié des frites, fabriquées dans le secteur, sont utilisées de façon interne, pour la production de revêtements.

Les frites émaillées sont employées dans la fabrication de revêtements émaillés, dont la principale application est la couverture de surfaces métalliques, pour les protéger des agressions physiques et chimiques. Le principal marché des émaux est la fabrication d'équipements de cuisson, l'une des applications étant le revêtement de hottes, fours, grills etc. Parmi d'autres applications figurent les cuves de stockage, les silos, les bains, les composants électroniques et la signalétique.

Les frites sont des produits pourvus d'une valeur ajoutée relativement élevée, à faible volume de production dont le prix du transport constitue, en général, une part relativement peu élevée du prix total du produit. Les fusions opérées dans le monde entier, dans ce secteur, ont donné lieu à une concentration d'entreprises de grandes dimensions dont la production est destinée à des marchés internationaux relativement vastes.

### 1.10.3 Considérations d'ordre commercial

[tm46 ANFFECC, tm8 S23.03]

Les volumes de production ont globalement subi une augmentation assez considérable. Les ventes, en Espagne ont augmenté en 1997, de plus de 15 %, une part significative de cette augmentation étant le résultat, des exportations vers les autres pays membres.

La concurrence est assez vive, dans ce secteur dans l'UE, aussi bien entre différents producteurs, à l'intérieur du même pays, qu'entre producteurs de différents Etats Membres. Les frites sont en grande partie destinées à une consommation interne. Mais les exportations représentent un débouché considérable, pour les producteurs de l'UE et sont, en général, plus élevées que les importations en provenance des pays tiers. Les performances du secteur des frites suivent de près celles de l'industrie céramique, dans son ensemble, dont elles dépendent lourdement. Les importations vers l'UE de produits, comportant l'utilisation de frites, en tant que composants, constituent une menace plus importante que l'importation des frites elles-mêmes.

La production de frites de verre constitue une activité stable, qui est au service de l'industrie céramique depuis des années. La concurrence exercée par les glaçures brutes, ne contenant pas de frites, est limitée, en raison des faibles propriétés de lessivage de ce type de glaçure. Les revêtements plastique ont été développés pour la vaisselle de table. Mais ils présentent également des problèmes de lessivage, surtout en présence d'acides organiques, communément contenus dans les aliments. On ignore dans quelle mesure les revêtements plastiques peuvent influencer le marché des revêtements frittés pour tuiles. Les produits de remplacement ne constituent pas une véritable menace pour l'émail transparent. Des produits alternatifs, tels que les vernis, pourraient être utilisés, dans des applications similaires. Mais ils ne peuvent pas



concurrencer les propriétés offertes par les frites, en termes de résistance thermique et chimique, de résistance aux rayures, et de facilité de nettoyage.

#### 1.10.4 Principaux problèmes environnementaux

Les principaux problèmes liés à la production de frites sont la température élevée et la forte consommation d'énergie qu'implique ce procédé. Cela provoque l'émission du produit de la combustion et l'oxydation à haute température de l'azote atmosphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les émissions des fours contiennent également des poussières générées par la volatilisation et la condensation successive des matières volatiles, présentes dans la composition, ainsi que des traces de chlorures, de fluorures et de métaux présents sous forme de scories, dans les matières premières. Les frites, produites pour les revêtements émaillés, peuvent provoquer des niveaux considérables d'émissions atmosphériques de fluorures, en raison de l'emploi de composants à base de fluorures. Des solutions techniques sont disponibles pour réduire les niveaux d'émission. Chaque technique ayant, toutefois, différentes implications techniques et financières.

L'eau est essentiellement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement, mais aussi pour briser le verre fondu, afin de produire des frites, trempe, et pour le broyage par voie humide. Généralement, ces circuits hydrauliques sont des circuits fermés, dotés d'un système de purge. L'eau utilisée pour la trempe et le broyage peut ne pas nécessiter de purge. Mais les particules solides devront être séparées.

Le niveau de déchets solides est extrêmement faible et provient essentiellement des particules solides des circuits hydrauliques. Dans de nombreux cas, les déchets provenant de la réduction des poussières peuvent être recyclés dans les fours.



## 2 PROCÉDES ET TECHNIQUES APPLIQUES

Les trois premiers paragraphes de ce chapitre concernent les matières premières et les questions liées à la fusion, qui s'appliquent à la plupart des secteurs de l'industrie du verre. Les paragraphes suivants décrivent séparément les questions spécifiques pour chaque secteur. Trois de ces secteurs, les laines minérales, les frites et les fibres céramiques, présentent des différences, en ce qui concerne les matières premières et les techniques employées. Ces différences ont été traitées dans les paragraphes relatifs à chacun des secteurs concernés.

### 2.1 Manipulation des matières premières

La diversité de l'industrie du verre est le résultat de l'utilisation d'un grand nombre de matières premières. La majorité des ces matières premières sont des composés solides inorganiques d'origine naturelle, minérale ou artificielle, comprenant, à la fois, des matières à l'état brut et des poudres extrêmement fines. Les liquides et, dans une moindre mesure, les gaz sont également utilisés dans ces secteurs.

Parmi les gaz employés figurent l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le dioxyde de soufre, le propane, le butane et le gaz naturel. Ils sont stockés et manipulés de façon traditionnelle, par exemple dans des conduites, des systèmes de stockage en vrac spécifiques et des cylindres. L'industrie du verre utilise aussi une large gamme de liquides, dont un certain nombre exigent de nombreuses précautions pour leur manipulation, comme le phénol et les acides minéraux les plus puissants. Toutes les formes de stockage et de manutention standard sont utilisées, entre autres, le stockage en vrac, les conteneurs intermédiaires en vrac, IBCs, les bidons et les conteneurs de petites dimensions. Les techniques disponibles, pour la réduction des émissions provenant du stockage et de la manutention des liquides, sont décrites au chapitre 4.

Les matières très grossières, dont le diamètre des particules est  $> 50$  mm, sont employées uniquement dans la production de la laine de pierre. Ces matières premières sont livrées par train ou par transport routier, puis directement acheminées vers les silos ou bien stockées dans des emplacements prévus à cet effet. Les emplacements de stockage peuvent être ouverts, partiellement fermés ou entièrement fermés. Il y a des exemples de tous ces types. Les silos sont généralement ouverts, pour ces types de matières premières, et sont remplis par un système de convoyeurs. Puis, les matières premières sont transportées vers le four, par un système de convoyeurs fermés. Le mélange se fait tout simplement en les distribuant simultanément sur le convoyeur.

Les matières premières en granulés ou en poudre sont livrées par chemin de fer ou par camion-citerne, et sont ensuite transférées, par voie pneumatique ou mécanique, aux silos de stockage en vrac. Pour être transférées par voie pneumatique, elles doivent être parfaitement sèches. L'air, déplacé dans les silos, est généralement filtré. Les matières premières en petites quantités peuvent être livrées en sacs ou petits tonneaux et acheminées par gravité, dans les réservoirs à agitation.

Dans la production de gros volumes de verre en continu, les matières premières sont transférées dans des silos intermédiaires, dans lesquels elles sont pesées, souvent de façon automatique, pour obtenir un « lot » parfaitement équilibré. Le « lot » est ensuite mélangé et acheminé vers la zone du four, où il est introduit dans le four par une ou plusieurs trémies. Différents mécanismes d'alimentation sont utilisés, des systèmes entièrement ouverts ou des systèmes complètement fermés à vis. Afin de réduire les poussières pendant le transfert des particules fines « hors du four », on peut conserver un certain pourcentage d'eau dans le mélange, généralement entre 0 et 4 %, certains procédés, par exemple la production de verre au borosilicate emploie des compositions sèches. L'eau peut être introduite dans le mélange sous forme de vapeur, au terme des opérations d'agitation. Mais les matières premières peuvent également avoir un contenu intrinsèque d'eau. Dans le verre sodocalcique, la vapeur est utilisée pour maintenir la

température au-dessus de 37°C, en évitant ainsi que la composition soit desséchée par l'hydratation du carbonate de sodium.

En raison de son abrasivité et de la taille de ses particules, le calcin est généralement manipulé séparément d'autres matières premières, employées dans la composition, et peut être introduit dans le four par petites quantités, par un circuit séparé.

Dans la fabrication discontinue, l'atelier de composition est généralement plus petit et souvent géré manuellement. Après le mélange, la composition peut être stockée dans des trémies mobiles, contenant chacune une charge pour le four. Plusieurs charges, souvent de formules différentes, sont stockées, à côté du fondoir à verre, pour être utilisées pendant une certaine période de fusion. Les compositions mélangées ne peuvent être stockées trop longtemps avant d'être utilisées. Car les différents composants peuvent se séparer, empêchant d'obtenir une fusion homogène. La présence d'eau, dans la composition, sert à éviter cet inconvénient.

## 2.2 La fusion du verre

La fusion, à savoir le mélange des matières premières à haute température, pour obtenir le verre fondu, est le procédé essentiel de la production du verre. Le verre peut être fondu de différentes façons, en fonction du produit fini qu'on souhaite obtenir, de son utilisation finale, de la taille de l'usine et des facteurs commerciaux dominants. La formule du verre, les matières premières, la technique de fusion, le choix du combustible et la taille du four, dépendront de ces facteurs.

### 2.2.1 Matières premières utilisées dans la fabrication du verre

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm21 Schott]

Le Tableau 2.1 indique les principales matières premières utilisées dans la fabrication du verre. Un tableau plus détaillé figure au chapitre 3.

<b>Matières premières utilisées pour le formage du verre</b>
Sable siliceux, calcin provenant du procédé, calcin de la consommation
<b>Matières premières intermédiaires et de modification</b>
Carbonate de sodium, $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , calcaire, $\text{CaCO}_3$ , dolomite, $\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$ , feldspath, syénite néphélinique, carbonate de potassium, fluorine, alumine, oxyde de zinc, oxyde de plomb, carbonate de baryum, basalte, sulfate de sodium anhydre, sulfate de calcium et gypse, sulfate de baryum, nitrate de sodium, nitrate de potassium, bore contenant des matières premières, entre autres borax, colémanite, acide borique, oxyde d'antimoine, trioxyde d'arsenic, scories, calcium mélangé, aluminium, silicate de magnésium et sulfite de fer
<b>Agents colorants/décolorants</b>
Chromate de fer, $\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{Cr}_2\text{O}_3$ , oxyde de fer, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , oxyde de cobalt, sélénium/sélénite de zinc

**Tableau 2.1 : Matières premières de base employées dans la fabrication du verre**

Le sable est la principale matière première, intervenant dans la fabrication du verre. Car il constitue la plus importante source de  $\text{SiO}_2$ . Il s'agit d'une substance courante. Mais la plupart du sable n'est pas suffisamment pur, pour être utilisé dans la production du verre. Le point de fusion du sable est trop élevé, pour que la fusion soit économique et, généralement, il faut ajouter un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion.

Le carbonate de sodium,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , principale source d'oxyde de sodium, est utilisé en tant que fondant,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Pendant la fusion, l'oxyde de sodium s'intègre à la fusion et le dioxyde de carbone est libéré. Le sulfate de sodium est ajouté, en tant qu'agent affinant et oxydant, et constitue une source secondaire d'oxyde de sodium. L'oxyde de sodium est incorporé au verre. Tandis que les gaz d'oxyde de soufre sont libérés, à travers la fusion. Le carbonate de potassium,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , agit en tant que fondant et est utilisé dans certains procédés, en particulier dans la production de verres spéciaux. L'oxyde de potassium est incorporé à la fusion, tandis que le dioxyde de carbone est émis.

D'autres oxydes de métaux sont ajoutés au verre, afin de renforcer son réseau structurel et d'en améliorer la dureté et la résistance chimique. L'oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ , produit cet effet et est ajouté au verre, en tant que carbonate de calcium,  $\text{CaCO}_3$ , sous forme de calcaire ou de chaux. Il peut également être ajouté, sous forme de dolomite, qui contient à la fois du carbonate de calcium et du carbonate de magnésium,  $\text{MgCO}_3$ . L'oxyde d'aluminium,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , est ajouté afin d'améliorer la résistance chimique et d'augmenter la viscosité à basse température. Il est généralement ajouté sous forme de syénite néphélinique,  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , feldspath ou alumine. Mais il est également présent dans les scories de combustion et dans le sable feldspathique.

Les oxydes de plomb,  $\text{PbO}$  et  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ , sont utilisés pour améliorer la sonorité et augmenter l'indice de réfraction du verre, afin d'accroître la luminosité de produits tels que le verre au plomb. L'oxyde de baryum, dérivé du carbonate de baryum, l'oxyde de zinc ou l'oxyde de potassium peuvent remplacer l'oxyde de plomb. Mais ils ne peuvent assurer le même niveau de densité et de brillance que le verre au plomb. Leur emploi affecte également la malléabilité du verre fabriqué main.

Le trioxyde de bore,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , est essentiel dans certains produits, en particulier dans les verres spéciaux, verre au borosilicate, et les fibres de verre, laine de verre et silionne. Son effet le plus important est la réduction du coefficient d'expansion du verre. Tandis que, pour les fibres, il augmente la viscosité et la liquidité, qui favorisent le fibrage, et il confère une plus grande résistance à la corrosion générée par l'eau.

Tableau 2.2 ci-dessous montre certains des éléments utilisés pour colorer le verre. Les colorants peuvent être ajoutés dans la composition principale ou dans le canal du four, sous forme de frites colorées.

Elément	Ion	Couleur
Cuivre	$\text{Cu}^{2+}$	Bleu clair
Chrome	$\text{Cr}^{3+}$	Vert
	$\text{Cr}^{6+}$	Jaune
Manganèse	$\text{Mn}^{3+}$	Violet
Fer	$\text{Fe}^{3+}$	Marron clair
	$\text{Fe}^{2+}$	Bleu-vert
Cobalt	$\text{Co}^{2+}$	Bleu intense, dans les verres au bore, rose
	$\text{Co}^{3+}$	Vert
Nickel	$\text{Ni}^{2+}$	Marron gris, jaune, vert, bleu à violet en fonction de la matrice du verre.
Vanadium	$\text{V}^{3+}$	Vert dans le verre au silice, marron dans le verre au bore
Titane	$\text{Ti}^{3+}$	Violet, fusion avec réduction,.
Néodymium	$\text{Nd}^{3+}$	Violet rougeâtre
Sélénium	$\text{Se}^0$	Rose, aussi $\text{Se}^{2+}$ , $\text{Se}^{4+}$ , et $\text{Se}^{6+}$ , selon le type de verre
Praséodymium	$\text{Pr}^{3+}$	Vert clair

**Tableau 2.2 : Agents utilisés pour la coloration**

Les fluorures contenant des matières premières, par exemple la fluorine  $\text{CaF}_2$ , sont utilisés pour donner un aspect opaque à certains produits. Ceci s'obtient par la formation de cristaux dans le verre, qui le rendent laiteux et opaque. Les fluorures sont également utilisés, dans le secteur des fibres de verre à fil continu, afin d'optimiser la tension superficielle et la liquidité, en favorisant ainsi le fibrage et en réduisant le taux de rupture des fibres.

Une matière première de plus en plus importante, dans la fabrication du verre, c'est le calcin, à la fois issu de la fabrication et extérieur. En principe, tous les procédés recyclent le calcin. Mais pour certains, les conditions requises, en matière de qualité, font qu'on ne peut pas utiliser le calcin extérieur. Car il ne garantit pas suffisamment la qualité, pour être économiquement viable. Dans le secteur du verre d'emballage, le calcin constitue souvent plus de 80 % de la composition. Le calcin nécessite une énergie de fusion inférieure à celle des matières premières vierges, 1 tonne de calcin remplaçant approximativement 1,2 tonnes de matières premières vierges.

### 2.2.2 Le procédé de fusion

[tm21 Schott]

Le procédé de fusion est une association complexe de réactions chimiques et de procédés physiques. Ce paragraphe présente seulement un bref résumé des principaux aspects de la fabrication. La fusion peut être répartie en différentes phases qui nécessitent, toutes, un contrôle très minutieux.

#### Chauffage

Le système traditionnel et le plus courant, pour générer de la chaleur, destinée à faire fondre le verre, consiste à faire brûler des combustibles fossiles, au-dessus d'un bain de matières premières qu'on introduit, sans interruption, dans le four et qu'on retire ensuite, sous la forme de verre fondu. La température nécessaire, pour faire fondre et raffiner le verre, dépend de la formule de verre utilisée. Mais elle se situe généralement, entre 1 300°C et 1 550°C. A ces températures, le transfert de chaleur se fait principalement par échange radiatif, provenant en particulier de la voûte du four qui est chauffée par les flammes jusqu'à une température de 1 650 °C, mais aussi directement des flammes. Dans chaque type de four, l'alimentation a été conçue de façon à provoquer des courants de convection recyclés, à l'intérieur de la composition fondue, afin d'assurer l'homogénéité du verre fini, qui va être soumis au procédé de formage. La masse de verre fondu, contenue dans le four, est maintenue constante et le temps moyen de séjour de celle-ci, dans le four est de 24 heures de production, pour les fours à réservoir et de 72 heures pour les fours à bain métallique.

#### Fusion primaire

A cause de la faible conductivité de la composition, le procédé de fusion est initialement lent, afin de permettre la réalisation de nombreuses réactions chimiques et physiques. Au fur et à mesure que les matières premières se réchauffent, l'humidité s'évapore. Certaines matières premières se décomposent et les gaz, contenus dans les matières premières, s'échappent. Les premières réactions, décarbonisation, ont lieu à une température de 500°C environ. Les matières premières commencent à fondre entre 750°C et 1 200°C. Tout d'abord le sable commence à se dissoudre, sous l'effet des agents fondants. Le silice, contenu dans le sable, se mélange avec l'oxyde de sodium, contenu dans le carbonate de sodium, et avec d'autres matières premières, pour former des silicates. En même temps se dégagent de grosses quantités de gaz, de la décomposition des hydrates, des carbonates, des nitrates et des sulfates, en libérant des eaux usées, du dioxyde de carbone, des oxydes d'azote et des oxydes de soufre. Le verre fondu



devient enfin transparent et la phase de fusion est terminée. Le volume de verre fondu obtenu représente environ entre 35 et 50 %, du volume des matières premières vierges, présentes dans la composition, en raison de la perte de gaz et de l'élimination des interstices.

### **Affinage et Homogénéisation**

Le verre fondu doit être absolument homogène et sans bulles, avant de pouvoir être moulé, pour obtenir les différents produits. Cela veut dire que tous les composants doivent être parfaitement fondus et distribués, de manière homogène, et que toutes les bulles doivent être éliminées, à travers l'affinage.

Pendant le procédé de fusion, des bulles de gaz se dégagent, principalement du dioxyde de carbone, qui provient de la décomposition des carbonates, en particulier le carbonate de sodium et le calcaire, et, dans une moindre mesure, de l'air contenu dans les matières premières. Ces bulles doivent être éliminées du verre fondu. Car elles peuvent provoquer des défauts dans les produits finis, affectant notamment la résistance mécanique et l'aspect extérieur. Le mouvement ascensionnel des bulles contribue à mélanger physiquement la masse fondue, nécessaire pour obtenir un produit homogène, doté de propriétés physiques optimales. Les bulles montent vers la surface à une vitesse qui est fonction de leur taille et de la viscosité du verre. Les grosses bulles montent vite en contribuant au procédé d'agitation. Tandis que les plus petites bougent lentement, à des vitesses souvent inférieures à celles des gros courants de convection, présents à l'intérieur du four et sont, donc, plus difficiles à éliminer. Les petites bulles qui restent dans le produit fini sont appelées "graines".

Le dioxyde de carbone et les composants de l'air sont peu solubles, dans le verre fondu, et il faut généralement utiliser des agents affinant, pour éliminer définitivement les petites bulles, générées par le procédé de fusion. Le principe général de l'affinage chimique consiste à ajouter des matières premières qui, une fois dans la masse fondue, laisseront échapper des gaz dotés d'un degré adapté de solubilité dans le verre. En fonction de la solubilité du gaz dans le verre fondu, qui dépend, généralement, de la température, les bulles pourront augmenter de volume et remonter à la surface, ou bien être complètement résorbées. Les petites bulles présentent un rapport surface/volume élevé, qui permet un meilleur échange entre le gaz contenu dans les bulles et le verre.

L'agent affinant le plus fréquemment utilisé, dans l'industrie du verre, est le sulfate de sodium, qui se décompose, à une température d'environ 1 450°C, 1 200°C en présence d'agents de réduction, pour créer de l'oxyde de sodium, incorporé dans le verre, des oxydes de soufre gazeux et de l'oxygène. Les bulles d'oxygène se combinent avec d'autres gaz ou les absorbent, notamment le dioxyde de carbone et l'air, en augmentant ainsi de volume et en remontant à la surface. Les oxydes de soufre gazeux sont absorbés dans le verre, ou bien dans la vapeur de gaz d'échappement du four.

Dans la production de verre plat et de verre d'emballage, le sulfate de sodium représente de loin l'agent affinant le plus courant. Ceci est dû à son action parallèle, en tant qu'agent oxydant, dans le réglage du rédox, des éléments colorants du verre. Il s'agit également de l'agent affinant le moins cher, tout en étant efficace, pour la production industrielle de verre. Les autres agents affinant contiennent des composés du carbone, ainsi que des oxydes d'arsenic et d'antimoine. Ils sont plus coûteux, nocifs pour l'environnement et pour la santé et sont généralement utilisés pour la production de verres spéciaux. Le nitrate de sodium peut également être utilisé en tant qu'agent oxydant/affinant, surtout lorsqu'on veut obtenir un degré élevé d'oxydation. Le sulfate de calcium et différents nitrates sont parfois utilisés pour le verre plat coloré.

L'homogénéisation peut également être favorisée par l'introduction de bulles de vapeur, d'oxygène, d'azote ou, plus couramment, d'air dans le fond de la cuve. Ceci favorise la circulation et le mélange du verre, tout en améliorant l'échange de chaleur. Certains procédés, entre autres celui utilisé pour la fabrication de verre optique, emploient des dispositifs d'agitation, pour obtenir le niveau élevé d'homogénéité requis. Une autre technique d'affinage,

pour les installations de petites dimensions, surtout pour la production de verres spéciaux, consiste à faire augmenter la température du verre, de façon à le rendre moins visqueux et à faire remonter plus facilement les bulles à la surface.

Les températures maximales constatées de la voûte, dans des fours pour la production de verre, sont les suivantes : verre d'emballage 1 600°C, verre plat 1 620°C, verres spéciaux 1 650°C, fibres de verre à fil continu 1 650°C et laine de verre 1 400°C.

### Conditionnement

Les phases de fusion primaire et d'affinage sont suivies d'une phase de conditionnement, à plus basse température. Au cours de ce procédé, toutes les bulles solubles restantes sont résorbées, dans le verre fondu. En même temps, le verre fondu refroidit lentement pour atteindre une température de travail, comprise entre 900°C et 1 350°C.

Dans la fusion en discontinu, ces phases suivent un ordre séquentiel. Tandis que dans les fours en continu, les phases de fusion, ont lieu simultanément, à différents endroits, à l'intérieur du réservoir. La composition est introduite, à l'une des extrémités du réservoir, et coule ensuite à travers différentes zones, à l'intérieur du réservoir et de l'avant-creuset où la fusion primaire, l'affinage et le conditionnement ont lieu. Le procédé d'affinage, dans un four en continu, est beaucoup plus délicat.

Le verre ne coule pas à l'intérieur du réservoir, en une ligne continue, allant directement de l'enfourneuse à la goulotte, à l'intérieur de laquelle le verre atteint la température de travail, requise pour le traitement. En fait, le verre dévie en suivant les courants thermiques. La motte, à savoir le mélange froid de matières premières, ne fond pas uniquement à la surface, mais aussi en dessous, par le bain de verre fondu. Du verre, relativement froid et contenant des bulles, se forme sous la couche inférieure du mélange et va se déposer sur le fond de la cuve. Des courants ascensionnels adaptés doivent porter cette matière à la surface. L'affinage ayant lieu principalement, dans les fours à réservoir, à la surface de la masse en fusion, où les bulles ne doivent pas remonter trop loin, pour pouvoir s'échapper. Si les courants thermiques sont trop rapides, ils empêchent la réalisation de l'affinage, en transférant trop tôt le verre dans la zone de conditionnement. Des parois ou des déversoirs peuvent être construits, dans la structure interne du réservoir, afin de créer des voies d'écoulement idéales.

## 2.3 Techniques de Fusion

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Ce paragraphe résume les principales techniques de fusion, utilisées dans le secteur de la production du verre. Des techniques différentes sont utilisées dans les secteurs de la production de laine minérale et de frites. Elles seront traitées séparément, dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs. Comme indiqué plus haut, le choix de la technique de fusion dépend de plusieurs facteurs et, en particulier de la capacité requise, de la formule du verre, des prix des combustibles, des infrastructures existantes et des performances en matière d'environnement. Les fours généralement utilisés sont les suivants, avec inévitablement des exceptions :

- Pour des installations à grande capacité, >500 t/j, des fours régénératifs, à brûleurs transversaux sont généralement utilisés.
- Pour les installations de moyenne capacité, entre 100 et 500 t/j, des fours régénératifs, à flammes longitudinales sont préférés. Bien qu'on trouve également, selon les cas, des fours régénérateurs à brûleurs transversaux, des fours à récupération, et des fours oxycombustion ou électriques.

- Pour les petites installations, entre 25 et 100 t/j, on utilise généralement des fours à récupération, des fours régénératifs à flammes longitudinales et des fours oxycombustion ou électriques.

Le tableau ci-dessous fournit une estimation des différents types de fours de l'UE, avec les quantités et les capacités pour chacun d'entre eux.

Type de four	Nombre d'appareils	capacité de fusion (t/a)	capacité de fusion moyenne (t/j)
A boucle	265	13100000	135
A brûleurs transversaux	170	15300000	250
Electrique	100	1100000	30
Oxygène	30	1200000	110
Autres	335	4300000	35
<b>Total</b>	<b>900</b>	<b>35000000</b>	<b>110</b>

**Tableau 2.3 : Estimation des types de fours présents dans l'UE, en 1997 [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]**

Les fours pour la production du verre, sont généralement conçus pour fondre de grosses quantités, sur une période ininterrompue de douze ans, avec une production pouvant aller de 20 tonnes à plus de 600 tonnes de verre par jour. Le verre est contenu dans un réservoir, constitué de blocs de matériau réfractaire, de forme rectangulaire fermée par un couvercle à voûte ou par un ciel de foyer. Les fours électriques sont généralement plutôt carrés et sont munis d'un couvercle plat et d'une ouverture latérale, pour l'introduction des matières premières. Les blocs de matériau réfractaire sont maintenus en position par un châssis extérieur en acier. Il existe différents types de fours qu'on distingue, en général, par la méthode de réchauffement, le système de préchauffage de l'air de combustion et la position des brûleurs.

La fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie et le choix de la source d'énergie, de la technique de réchauffement et de la méthode de récupération de la chaleur est essentiel, pour la conception du four. Ces mêmes choix sont également parmi les facteurs les plus importants, affectant les performances environnementales et la consommation d'énergie, dans le procédé de fusion. Les trois principales sources énergétiques sont le gaz naturel, le fioul et l'électricité. Dans la première moitié du siècle, beaucoup de fabricants de verre utilisaient du gaz de gazogène, produit par la réaction de l'air et de l'eau avec du charbon porté au rouge.

L'utilisation du gaz naturel dans l'industrie du verre est de plus en plus courante, en raison de sa grande pureté, de sa facilité de contrôle et du fait qu'il ne nécessite aucune installation de stockage. De nombreuses entreprises préfèrent maintenant le gaz au fioul, afin de réduire les émissions de dioxyde de soufre, même si ce type de combustible est plus coûteux.

Dans les dernières décennies, le combustible le plus fréquemment utilisé, dans la fabrication du verre était le fioul. Il existe différents types de fioul, lourd ou léger, selon sa pureté et son contenu en soufre. On estime généralement, dans le secteur du verre, que les flammes produites par le fioul, qui possèdent une meilleure radiation que celles du gaz, donnent de meilleurs résultats de transmission de chaleur dans la fusion. Toutefois, maintenant que l'utilisation du gaz, en tant que combustible est mieux connue, on estime que la rentabilité et le contrôle opérationnel, offerts par celui-ci, deviennent de plus en plus proches de ceux du fioul.

Beaucoup de fours, de grandes dimensions, sont conçus pour fonctionner à la fois au gaz naturel et au fioul, en changeant tout simplement les brûleurs. Dans de nombreux cas, les contrats d'approvisionnement en gaz sont des contrats négociés qui peuvent être interrompus, pendant les périodes de pointe, ce qui nécessite des équipements adaptés pour pouvoir fonctionner avec un

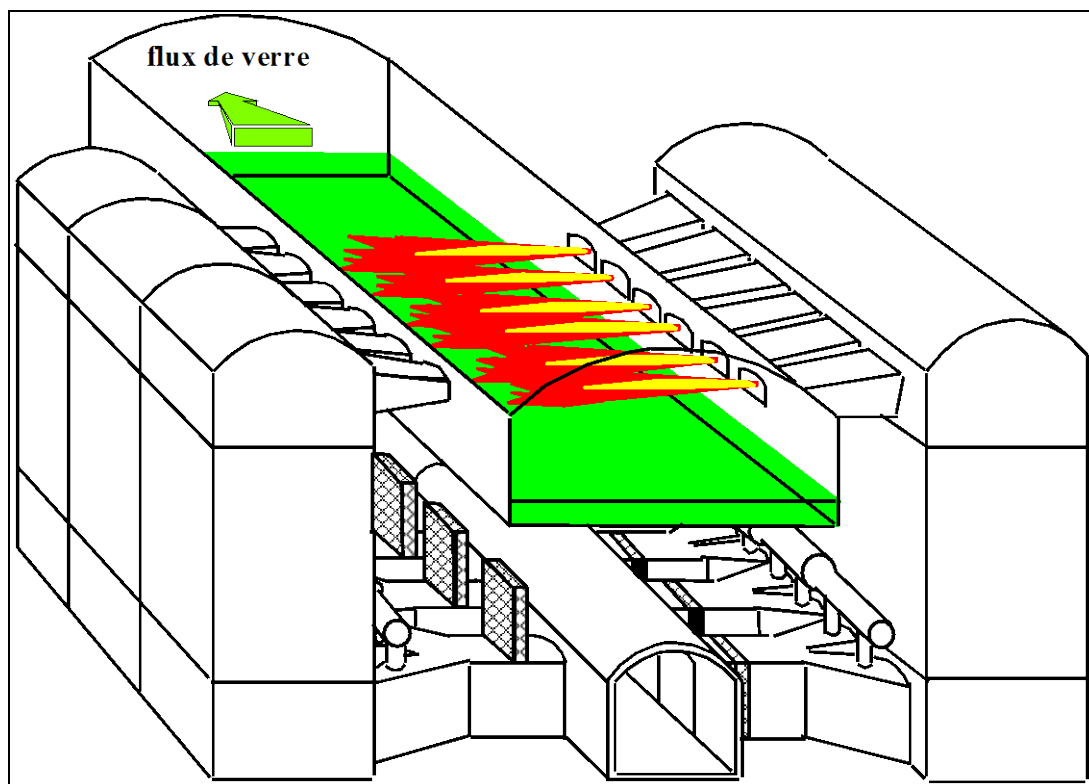
autre combustible. La principale raison de cette alternance périodique, entre le gaz et le fioul, est le prix des combustibles. Afin d'améliorer le contrôle de l'apport thermique, certains fours, généralement alimentés au gaz, peuvent parfois brûler du fioul.

La troisième source d'énergie utilisée couramment, dans la fabrication du verre, est l'électricité. L'électricité peut être utilisée en tant que source d'énergie unique ou bien être associée à des combustibles fossiles. Ceci est décrit de façon détaillée plus loin. L'énergie peut être employée en tant que source d'énergie de trois façons différentes, sous forme de résistance chauffante, où le courant passe à travers le verre fondu, en tant que chaleur par induction, où la chaleur est induite par la modification intervenue, dans un champ magnétique environnant et sous forme d'éléments chauffants. Le chauffage par résistance est la seule forme qui ait trouvé une application commerciale dans l'industrie du verre et, c'est la seule technique qui sera prise en considération dans le présent document.

### 2.3.1 Fours régénératifs

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm1 RUDoE]

Le terme " régénératifs " se rapporte au système de récupération de la chaleur utilisée. Les brûleurs employés, pour la combustion des combustibles fossiles, sont généralement situés à l'intérieur ou en dessous des orifices de l'air de combustion/des gaz d'échappement. La chaleur, contenue dans les gaz d'échappement, est utilisée pour préchauffer l'air, avant la combustion. Pour obtenir cela, on fait passer les gaz dans une chambre contenant des matériaux réfractaires, qui absorbent la chaleur. Seules une ou deux séries de brûleurs sont allumées à la fois. Après un délai préétabli, généralement de vingt minutes, le cycle de chauffage du four est inversé et l'air de combustion passe à travers la chambre, préalablement chauffée par les gaz d'échappement. Un four régénératif possède deux chambres de régénération. Pendant que l'une est réchauffée, par les gaz d'échappement, provenant du procédé de combustion, l'autre préchauffe l'air de combustion en entrée. La plupart des usines, de production de verre d'emballage, possèdent soit des fours à brûleurs transversaux, soit des fours à boucle, et tous les fours pour la production de verre float sont des fours régénératifs, à brûleurs transversaux. On peut atteindre ainsi des températures de préchauffage de 1 400 °C, permettant d'obtenir un excellent rendement thermique.



### Schéma 2.1 : Un four régénératif à brûleurs transversaux

Dans les fours régénératifs à brûleurs transversaux, les orifices de combustion et les brûleurs sont situés sur les côtés du four. Tandis que les chambres de régénération sont situées d'un côté ou de l'autre du four, et sont reliées à celui-ci, par les gorges des brûleurs. La flamme passe au-dessus des matières en fusion, puis entre directement dans les gorges, situées sur le côté opposé. Le nombre de gorges, jusqu'à 8, utilisées, est fonction de la taille et de la capacité du four, ainsi que de sa structure spécifique. Dans certains fours, de grandes dimensions, chaque entourage de brûleur peut comporter sa propre chambre de régénération.

Ce type de structure, utilisant de manière rentable un grand nombre de brûleurs, est particulièrement adaptée pour de grandes installations. Car elle facilite la diversification de la température, sur toute la longueur du four, qui est nécessaire pour stimuler les courants de convection requis, dans le verre en fusion.

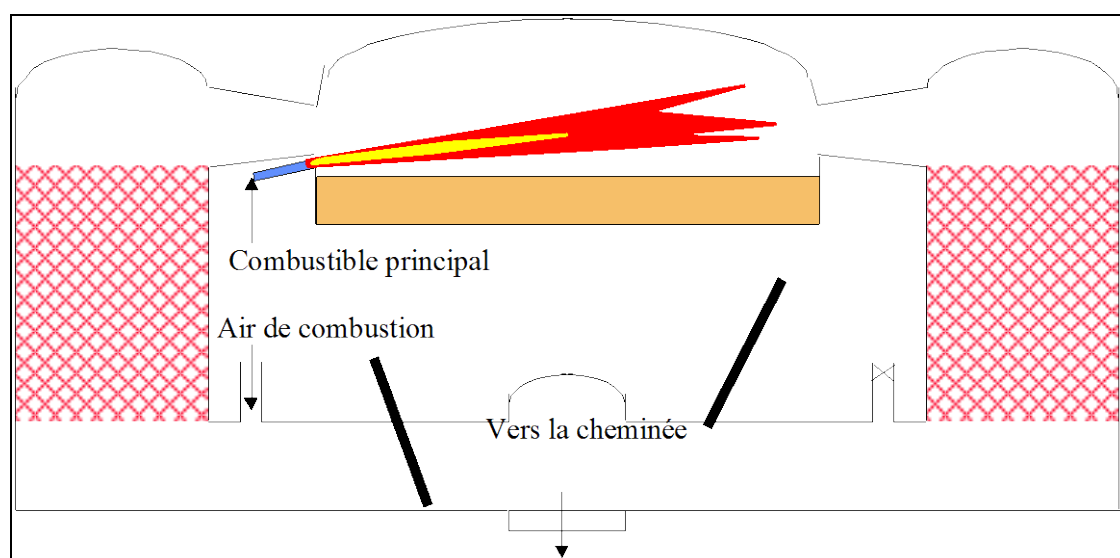


Schéma 2.2 : Section d'un four régénératif

Dans les fours régénératifs à boucle, le principe de fonctionnement est le même. Toutefois, les deux chambres de régénération, sont situées à l'une des extrémités du four et chacune est équipée d'un seul entourage. Le parcours de la flamme forme un U, et retourne dans le régénérateur adjacent, à travers le deuxième entourage. Ce système de régénération est moins coûteux, par certains aspects, que la structure à brûleurs transversaux. Mais il est moins flexible, en ce qui concerne le réglage de la température du four et, donc, moins fréquemment utilisé pour les fours de grandes dimensions.

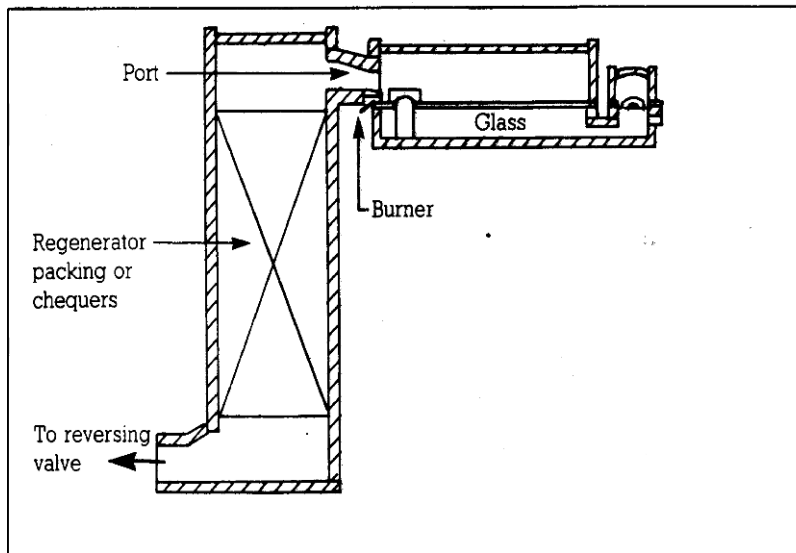


Schéma 2.3 : Four régénératif à boucle à un seul passage

Schéma 2.4 : Plan d'un four régénératif à boucle

### 2.3.2 Fours à récupération

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le récupérateur représente une autre méthode courante, de récupération de la chaleur, généralement employée pour les fours de plus petites dimensions. Dans ce type de structure, l'air froid en entrée est indirectement chauffé par un flux continu de gaz de combustion, passant à travers un échangeur de chaleur métallique ou, très rarement, en céramique. Les températures de préchauffage de l'air se limitent à environ 800°C, pour les récupérateurs métalliques, la chaleur récupérée, par cette méthode étant donc inférieure à celle récupérée par les fours régénératifs. Ce rendement thermique moindre peut être compensé, grâce à des systèmes complémentaires de récupération de la chaleur, à travers les gaz d'échappement, soit pour le préchauffage des matières premières, soit pour la production de vapeur. Toutefois, en raison du rendement thermique inférieur des fours à récupération, leur capacité de fusion est limitée à 2 tonnes/m<sup>2</sup>/jour, contre une moyenne de 3,2 tonnes/m<sup>2</sup>/jour, pour les fours régénératifs, dans le secteur du verre d'emballage. Cette capacité de fusion insuffisante peut être partiellement compensée, par l'utilisation d'un boosting électrique.

Bien que, à l'origine, les fondoirs à verre à chauffage direct, n'aient pas été nécessairement équipés de récupérateurs de chaleur, actuellement ils le sont tous et le terme "fondeur à verre à chauffage direct", est devenu synonyme de four à récupération. Les brûleurs sont situés le long de chaque côté du four, de manière transversale, par rapport au flux du verre, et ils chauffent en permanence des deux côtés. Ceci permet un meilleur contrôle et une plus grande stabilité des températures, par rapport aux fours à boucle. En contrôlant les brûleurs, pour créer un gradient de température à l'intérieur du four, les courants de convection générés guident les gaz chauds, produits par la combustion, au-dessus de la surface du composition, et à travers l'orifice d'échappement, placé à l'extrémité supérieure du four.

Ce type de four est principalement utilisé, lorsqu'une grande flexibilité de fonctionnement est requise, avec un investissement initial minimum. En particulier lorsque le volume de production est trop limité, pour permettre une utilisation financièrement viable des régénérateurs. Il est plus adapté à des usines de petites dimensions. Bien qu'on le trouve parfois dans des installations dotées d'une plus grande capacité, jusqu'à 400 tonnes par jour.



### 2.3.3 La Fusion à l'oxygène

Cette technique implique le remplacement de l'air de combustion par de l'oxygène, > 90 % de pureté. L'élimination de la majorité de l'azote, de l'atmosphère de combustion, réduit le volume des gaz d'échappement, presque entièrement composé de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau, pour deux tiers environ. Par conséquent, des économies d'énergie sont possibles. Car il n'est pas nécessaire de réchauffer l'azote atmosphérique, pour atteindre la température des flammes. La formation de NO<sub>x</sub> thermique est extrêmement réduite. Car le seul azote présent dans l'atmosphère de combustion est l'azote résiduel, présent dans l'oxygène, l'azote présent dans le combustible, l'azote provenant de la décomposition des nitrates et celui de l'air parasite.

Généralement, les fours oxycombustion ont la même structure que les fours à récupération, avec plusieurs brûleurs latéraux et un seul orifice de sortie des gaz d'échappement. Toutefois, les fours, conçus pour la combustion de l'oxygène, n'utilisent pas de systèmes de récupération de la chaleur, pour préchauffer l'oxygène qui alimente les brûleurs.

Le principe de fonctionnement des fours oxycombustion est bien accepté, surtout dans la production des frites. En revanche, la technique correspondante est encore considérée, par certains secteurs, comme une technologie en cours de développement, comportant des risques financiers potentiels importants. Un travail considérable de développement a été entrepris et la technique est de plus en plus largement acceptée, au fur et à mesure que le nombre d'usines, qui l'utilisent augmente. Nous allons traiter de cette technique de façon détaillée au chapitre 4.

### 2.3.4 Fusion Electrique

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm8 S2 3.03, tm1 RUDoE]

Un four électrique est constitué d'une caisse, intérieurement revêtue de matériau réfractaire, soutenue par un châssis en acier, et munie d'électrodes, qui sont introduites latéralement, par en haut, ou habituellement, par le fond du four. L'énergie de fusion est fournie par une résistance chauffante, lorsque le courant passe à travers le verre en fusion. Il faut, donc utiliser des combustibles fossiles, lorsque le four est mis en route, au début de chaque campagne. Le four fonctionne en continu et possède une durée de vie comprise entre 2 et 7 ans. La surface du verre en fusion est recouverte d'une couche de composition, qui fond, ensuite, progressivement de bas en haut, d'où le terme de procédé à couverture de composition. Une nouvelle quantité de mélange est ajoutée sur la surface, généralement par un système de convoyeurs, qui vont d'un côté à l'autre de la surface. La plupart des fours électriques sont équipés de filtres à manches et les matières collectées sont recyclées, à l'intérieur du fondoir à verre.

Cette technique est généralement appliquée pour les fours de petites dimensions, notamment dans la fabrication de verres spéciaux. La principale raison est que le rendement thermique des fours, alimentés par des combustibles fossiles, diminue en même temps que la taille du four, et la perte de chaleur par tonne de matière fondue peut être assez considérable, pour les fours de petites dimensions. La perte de chaleur des fours électriques est bien moins importante, en comparaison et la différence de coût de fusion, entre l'alimentation électrique et l'alimentation aux combustibles fossiles, est moins significative, pour les fours de petites dimensions que pour les grands fours. Parmi les autres avantages, que représente la fusion électrique, pour les fours de petites dimensions, figurent des coûts de réfection moindres, un fonctionnement plus facile et de meilleures performances en matière d'environnement.

Toutefois, la viabilité financière des fours électriques est limitée, en raison du prix de l'électricité, bien plus élevé que celui des combustibles fossiles. Les fours électriques permettent de réaliser des taux de fusion par mètre carré de four plus élevés, et leur rendement thermique est deux à trois fois supérieur à celui des fours à combustible fossile. Toutefois, ceci n'est souvent pas suffisant pour compenser, pour les fours de grandes dimensions, le coût plus élevé de l'électricité.

En raison de l'absence de combustion, dans la fusion électrique, le volume des gaz d'échappement est extrêmement faible, ce qui a pour résultat des faibles résidus de particules et par conséquent, des équipements de réduction secondaires de dimensions réduites. L'émission de composants volatiles est considérablement inférieure à celle des fours traditionnels, le flux de gaz étant moins important et l'absorption et réaction des émissions gazeuses dans la couche de la composition. La principale émission gazeuse c'est le de dioxyde de carbone, provenant du carbone présent dans la composition.

Le remplacement total des combustibles fossiles, dans le four, élimine la formation des produits de la combustion, notamment du dioxyde de soufre, du NOx thermique et du dioxyde de carbone. Toutefois, dans l'analyse globale de ces données, il convient de prendre en compte les émissions produites par l'usine de production d'énergie électrique, ainsi que la rentabilité de la génération et de la distribution de l'électricité.

La fusion électrique utilise le nitrate de sodium ou du nitrate de potassium, dans la composition. On estime généralement, que le nitrate est nécessaire dans les fours électriques à couverture à froid, pour créer les conditions d'oxydation indispensables à un procédé de fabrication stable, sûr et rentable. Il est vrai, par ailleurs, que le nitrate se décompose à l'intérieur du four, en libérant des oxydes d'azote, mais à des niveaux plus faibles que ceux produits par les fours traditionnels, à combustible fossile.

### **2.3.5 Fusion combinée au combustible fossile et à l'électricité**

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm8 S2 3.03]

Cette technique est utilisée principalement de deux façons, par une alimentation majoritaire au combustible fossile, avec boosting électrique, ou bien une alimentation électrique majoritaire, avec ajout de combustible fossile. Le pourcentage d'apport thermique de chaque type peut naturellement, varier en fonction de chaque technique.

Le boosting électrique consiste à ajouter davantage de chaleur, dans un fondoir à verre, en faisant passer du courant électrique, à travers des électrodes, placées sur le fond de la cuve. Cette technique est habituellement utilisée dans les fours à combustible fossile, dans l'industrie du verre. Généralement, elle est employée pour augmenter le rendement d'un four à combustible fossile, afin de pouvoir répondre à des fluctuations périodiques de la demande, sans devoir supporter les coûts fixes d'un four de dimensions plus grandes. Cette technique peut être appliquée pendant le fonctionnement du four. Elle est souvent utilisée pour maintenir le taux d'un four qui approche de la fin de sa durée de vie, ou bien pour augmenter la capacité d'un four existant.

Le boosting électrique peut être également employé pour améliorer les performances environnementales d'un four, en remplaçant l'alimentation électrique par la combustion pour une niveau de rendement donné. Généralement, de 5 % à 20 % de l'apport total d'énergie, est fourni par le boosting électrique. Mais on peut atteindre également des valeurs plus élevées. Toutefois, les entreprises n'ont pas recours à un haut niveau de boosting électrique, à long terme, pour la production de base, en raison des coûts d'exploitation élevés que cela comporte. Des niveaux variables de boosting électrique sont souvent employés, dans la fabrication de verre coloré, en raison du faible niveau de transmission de la chaleur du verre vert et ambré.

Une technique moins connue est celle qui consiste à ajouter du gaz ou du pétrole, en tant que combustible d'appoint, pour les fours essentiellement électriques. On porte, tout simplement, les flammes au-dessus de la surface de la composition, afin d'apporter de la chaleur supplémentaire aux matières premières, en favorisant ainsi la fusion. Cette technique est parfois connue sous le nom de "surcuisson" et souvent utilisée pour résoudre certaines difficultés de fonctionnement de la fusion 100% électrique.

Evidemment, cette technique annule certains avantages, associés à la fusion à froid sans combustion.

### 2.3.6 Fusion en discontinu

[tm21 Schott]

Lorsqu'on a besoin uniquement de petits volumes de verre, notamment lorsque la formule change fréquemment, il est parfois trop coûteux de faire fonctionner un four en continu. Dans ces cas, les fours à pots ou les réservoirs journaliers sont utilisés, pour faire fondre certains mélanges de matières premières. La plupart des installations de ce type ne rentrent pas dans le cadre d'attribution de compétences de la PCIP. Car leur capacité est souvent inférieure à 20 tonnes par jour, de verre fondu. Toutefois, dans la gobeletterie et dans la fabrication des verres spéciaux, il y a des exemples de capacités supérieures, surtout lorsque différentes activités sont réalisées dans la même usine.

Les fours à pots sont généralement constitués de briques réfractaires, sur les parois internes, de silice pour la voûte et isolantes pour les parois externes. Les fours à pots sont composés essentiellement d'une partie inférieure, destinée au préchauffage de l'air de combustion, avec un système régénératif ou à récupération, et d'une partie supérieure, servant de chambre de fusion, dans laquelle sont placés les pots. Dans la partie supérieure sont placés six à douze pots, en argile réfractaire, dans lesquels on peut fondre différents types de verre.

Il existe deux types de pots. Les pots ouverts et les pots fermés. Les pots ouverts n'ont pas de couvercle et le verre est en contact avec l'atmosphère du four. Les pots fermés ont un couvercle et leur seule ouverture est constituée par l'ouvreau de cueillage. Pour les pots ouverts, la température est contrôlée par le réglage du chauffage du four. Tandis que pour les pots fermés, le chauffage est constant et la température est contrôlée par l'ouverture ou la fermeture de l'ouvreau de cueillage. La capacité de chaque pot est généralement comprise entre 100 kg et 500 kg, avec une durée de vie de 2 à 3 mois, avec fonctionnement continu.

Le four est chauffé pendant 24 heures chaque jour. Mais la température, du verre uniquement pour les pots fermés, varie en fonction de la phase de production. Généralement, la composition est introduite, dans les pots et fondue dans l'après-midi, et la température augmente progressivement pendant la nuit, afin de raffiner la fusion, de façon à ce que le verre puisse être traité le lendemain matin. Pendant la phase de fusion, la température peut grimper jusqu'à 1 300°C à 1 600°C, selon le type de verre. Tandis que pendant l'extraction et le traitement du verre, la température du four reste comprise entre 900°C et 1 200°C.

Les réservoirs journaliers ont été développés après, à partir des fours à pots, afin d'obtenir de plus grosses capacités, avoisinant les 10 tonnes par jour. D'un point de vue structurel, ils ressemblent davantage au quadrilatère d'un four traditionnel. Mais ils sont encore alimentés avec la composition chaque jour. La fusion a généralement lieu la nuit et le verre passe à la phase de production le lendemain. Ce modèle de réservoir permet de fondre rapidement un autre type de verre que celui initialement prévu. Il est principalement utilisé pour la fabrication de verre coloré, de cristal au plomb et de verre tendre spécial.

### 2.3.7 Fondeurs à verre spéciaux

[SORG LoNOx, SORG Flex]

L'attention consacrée à la réduction des émissions a amené certains concepteurs de fours à proposer des fours à chauffage direct, dotés de caractéristiques destinées à permettre des températures de flammes moins élevées. Le four le plus connu, dans cette catégorie, est le Sorg LoNOx.

Le fondoir à verre Sorg LoNOx utilise un affinage par "bain creux" et le préchauffage des matières premières, afin de réduire le niveau de Nox, sans diminuer le rendement thermique. L'affinage par "bain creux" pousse le courant critique vers la surface du bain, en réduisant ainsi la différence de température entre celui-ci et la structure du four. Ce four peut fonctionner à des températures moins élevées que celles d'un four traditionnel de même capacité. Nous allons décrire de façon plus détaillée cette technique au chapitre 4.

Un autre type de four est le Sorg Flex, qui est commercialisé principalement en tant qu'équipement alternatif, par rapport au four à pots et au réservoir journalier. Il fonctionne avec un mélange d'électricité et de gaz naturel, ce qui donne un four compact, avec des températures et une consommation d'énergie peu élevées. Le four a une zone de fusion et une zone d'affinage, reliées par une goulotte. La zone d'affinage consiste en une rampe creuse, suivie d'une zone plus profonde. La zone de fusion est chauffée à l'électricité, tandis que la zone d'affinage est chauffée au gaz. Mais des électrodes peuvent être ajoutées à l'entrée. Les gaz d'échappement, provenant de la zone d'affinage, passent à travers la zone de fusion, et au-dessus du mélange. Une série d'arcs bas servent à empêcher que la chaleur radiante, provenant de la partie la plus chaude du four, atteigne les zones les plus froides, de façon à ce qu'une grande partie de l'énergie, contenue dans les gaz d'échappement, soit transférée dans la composition.

La séparation de la zone de fusion et de celle d'affinage est l'élément essentiel pour assurer la flexibilité du four. Pendant les périodes d'arrêt, les températures baissent et la volatilisation, provenant de l'affinage est réduite. Aucun drainage n'est nécessaire et, en raison du faible volume de verre, la température normale de fonctionnement est rapidement rétablie. Le faible volume permet également de changer rapidement de composition.

## 2.4 Verre d'emballage

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm1 RUDoE]

Ce paragraphe traite de la fabrication du verre d'emballage, à base de chaux sodée, et de formules modifiées de chaux sodée, par l'application de procédés entièrement automatisés. La fabrication d'autres produits est traitée dans les paragraphes consacrés aux secteurs du verre pour gobeletterie et des verres spéciaux. La composition habituelle du verre d'emballage figure au Tableau 2.4 ci-dessous. Etant donné la grande variété qui caractérise ce secteur, toutes les techniques de fusion, décrites au Paragraphe 2.3, sont utilisées dans la production du verre d'emballage.

Composant	Pourcentage
Oxyde de silicone $\text{SiO}_2$	71 à 73
Oxyde de sodium $\text{Na}_2\text{O}$	12 à 14
Oxyde de calcium $\text{CaO}$	9 à 12
Oxyde de magnésium $\text{MgO}$	0,2 à 3,5
Oxyde d'aluminium $\text{Al}_2\text{O}_3$	1 à 3
Oxyde de potassium $\text{K}_2\text{O}$	0,3 à 1,5
Trioxyde de soufre $\text{SO}_3$	0,05 à 0,3
Modificateurs de couleur etc.	Traces

**Tableau 2.4 : Composition habituelle du verre d'emballage**

Les verres d'emballage sont produits par un procédé de moulage, en deux phases, pendant lequel on applique des techniques d'estampage et de soufflage. Voici les cinq étapes essentielles de la production automatisée d'une bouteille :

1. Au départ, il y a un morceau de verre fluide, paraison, ayant le bon poids et la bonne température.

2. On moule la première forme dans un premier moule, moule d'ébauchage, en exerçant une pression avec de l'air comprimé ou un piston métallique.
3. On transfère ensuite la première forme, paraison, dans le moule définitif, moule de finition.
4. Le procédé de moulage est complété en soufflant de l'air comprimé sur le récipient pour lui donner la forme du moule définitif.
5. Le produit fini est sorti du moule et soumis au traitement suivant.

Le verre liquide coule du four à travers l'avant-creuset, jusqu'à une goulotte d'évacuation, située à l'extrémité. En partant du fond de la goulotte, un à quatre flots parallèles de verre liquide sont formés, à travers les orifices adaptés. Ces flots de verre, modulés par un système de piston mécanique, sont découpés à la bonne longueur, par un mécanisme spécial, qui crée les premiers paraisons, en forme de "saucisse". Le système complet de formage des paraisons est appelé le mécanisme d'alimentation. Les paraisons sont découpés simultanément à partir de flots de verre parallèles, et sont ensuite moulés simultanément, dans des moules placés sur la machine de formage. Il peut s'agir de machines à un seul, deux, trois ou quatre paraisons, ces dernières étant particulièrement adaptées à la production de gros volumes de petits emballages. La machine à double paraison est la plus courante. Les fours pour verre à emballage peuvent alimenter deux ou plusieurs machines de ce type, chacune à travers un avant-creuset spécifique.

Un mélange d'eau et d'huile soluble est ensuite vaporisé sur les lames, pour éviter qu'elles surchauffent et que le verre colle à celles-ci. Depuis le mécanisme d'alimentation, les paraisons sont guidés par un système de goulottes, dans les moules d'ébauchage de la machine.

Le procédé de formage comprend deux phases, comme indiqué dans le Schéma 2.5. Le formage initial du calque peut être effectué, soit par pression à l'aide d'un piston, soit par soufflage à l'air comprimé, selon le type d'emballage. L'opération de moulage final est toujours effectuée par soufflage, afin d'obtenir la forme creuse finie. Ces deux phases du procédé sont, donc, appelées, respectivement : "pressé soufflé" et "soufflé soufflé". Les récipients ainsi formés sont ensuite soumis aux opérations de post-formage sur un convoyeur en continu. Le procédé pressé- soufflé est particulièrement adapté pour la production de bocaux. Mais il est également utilisé pour la fabrication de bouteilles légères. Le formage, par le procédé soufflé-soufflé, est plus flexible, et on le préfère pour la fabrication de bouteilles standard et de formes plus complexes. Le Schéma 2.5. montre un schéma simplifié des deux procédés.

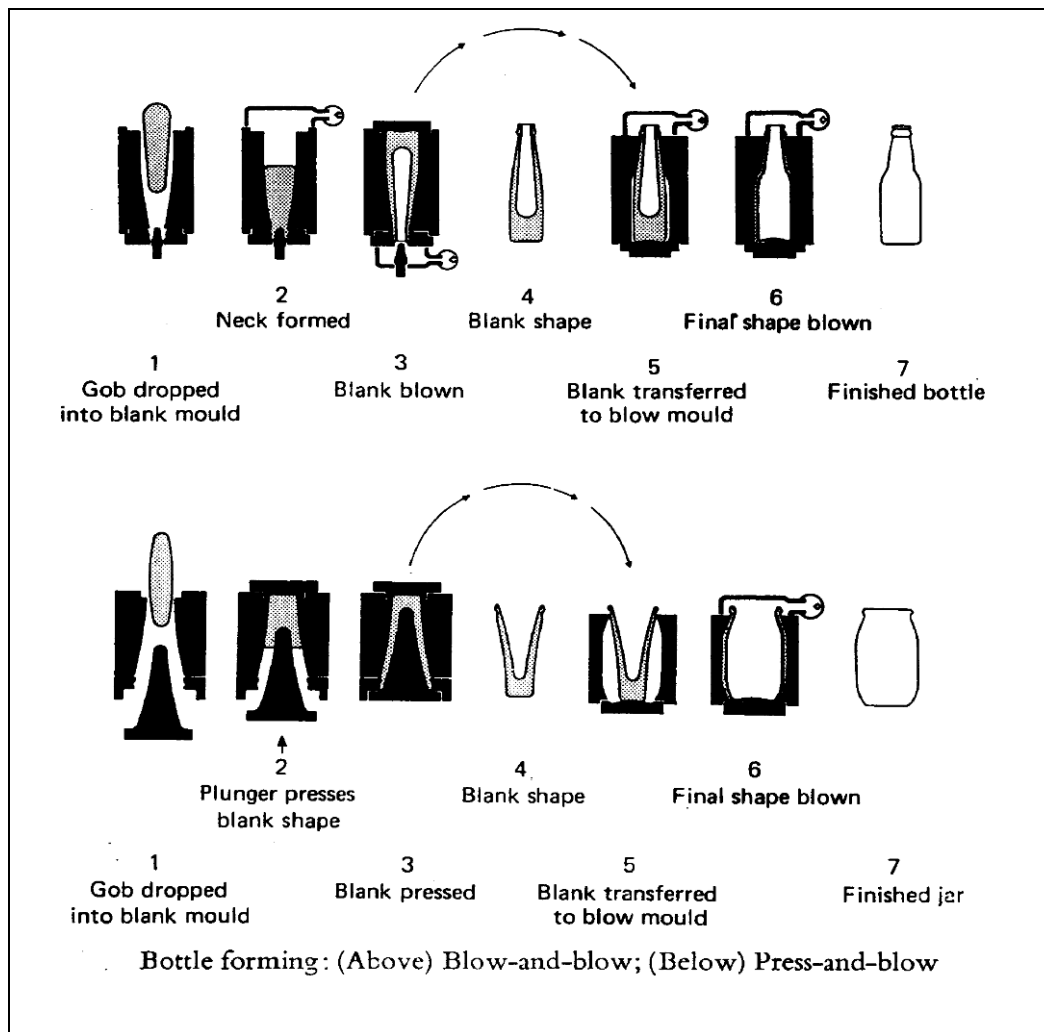


Schéma 2.5 : Formage par pressé-soufflé et par soufflé-soufflé

Pendant le procédé de formage, la température du verre baisse jusqu'à 600°C, pour que les emballages soient suffisamment solides, lorsque le convoyeur les prend en charge. L'extraction de la chaleur est obtenue en soufflant de grandes quantités d'air sur les moules et à travers les moules. Afin d'éviter que le verre colle aux moules, on applique manuellement et automatiquement, sur certaines parties des moules, des agents démoulants haute température à base de graphite, "décolmatage". Les moules doivent être nettoyés et entretenus périodiquement.

Le flux de verre, provenant de l'avant-creuset, doit être maintenu constant, afin de conserver la stabilité de la température, la viscosité et l'homogénéité du verre destiné au formage. Lorsque le procédé de formage est interrompu, dans l'une des sections, les paraisons de verre chaud sont détournées, à travers des goulottes, vers la base du réservoir, où ils sont refroidis à l'eau, fragmentés et ensuite ré-acheminés vers l'atelier de composition, avec tous les autres déchets de fabrication et le calcin à recycler.

Les premières machines automatiques étaient rotatives et, bien que des machines de formage pour vaisselle utilisent encore ce type de principe, la production d'emballages est presque exclusivement réalisée en employant des machines à Section Individuelle, plus flexibles. Les machines à Section Individuelle comprennent plusieurs unités de fabrication de récipients, sections, assemblées côte à côte. Chaque section possède un nombre de creux de moule correspondant au nombre de paraisons à former en parallèle. Les paraisons sont livrés les uns après les autres, aux différentes sections, par le biais d'un système composé d'une poche et d'un



bac, distributeur de paraisons et livraison. Les machines à SI comportent généralement entre 6 et 20 sections, selon le volume de production et le type de marché auquel les produits sont destinés. L'un des principaux avantages des machines SI est la possibilité d'arrêter séparément chaque section, pour effectuer des réglages, ou remplacer des pièces de moules.

La fabrication automatique d'emballages peut être utilisée pour la production de bouteilles et de bocaux de n'importe quelle taille, forme et couleur. La vitesse de production est d'autant plus élevée que la forme est simple. Les bouteilles de bière légères, de forme arrondie, ont une vitesse de production qui peut atteindre jusqu'à 750 bouteilles /minute, sur des machines SI à 12 sections, et à quadruple paraison.

Le refroidissement rapide, de la surface externe des emballages, crée des écarts de tension importants dans le verre et le fragilisent. Afin d'éviter cet inconvénient, les emballages sont introduits dans une arche de recuisson en continu, lehr, où ils sont réchauffés jusqu'à 550°C, puis refroidis sous certaines conditions de contrôle, afin de prévenir des tensions ultérieures. Les Lehrs sont chauffés au gaz ou à l'électricité. Mais lorsque la température de fonctionnement est atteinte, une grande partie de l'énergie thermique est fournie par la chaleur des récipients introduits dans la galerie. Une fois suffisamment refroidis, les emballages sont automatiquement vérifiés et soumis à un système de mise au rebut automatique, en cas de non-conformité en matière de tolérances ou autres problèmes de qualité. Après la vérification, les produits sont montés sur palettes, en cartons ou en vrac, puis emballés et stockés avant d'être livrés aux clients finaux.

Le rendement de la production dans son ensemble, est calculé en rapport "emballage/matière fondue", c'est à dire le poids en tonnes des récipients emballés, pour être expédiés, en pourcentage du poids en tonnes du verre fondu dans le four. Les usines de production d'emballages, pour l'industrie agroalimentaire, atteignent généralement des rapports emballage/matière fondue, compris entre 85 % et 94 %. Les parfums de luxe et les produits pharmaceutiques sont soumis à des vérifications plus sévères et, dans ce cas, le rapport tourne autour de 70 %.

Afin d'améliorer les performances des produits, des traitements de surface peuvent être appliqués tout de suite après le formage, ou bien pendant que les produits se trouvent encore à une température supérieure à 500°C, "revêtement à chaud", ou après la recuisson, "revêtement à froid". Généralement on utilise une combinaison de ces deux procédés.

Les emballages en verre sont ensuite soumis à des systèmes de vérification, d'emballage, de déballeage, de remplissage et de remballage. Afin d'éviter que les emballages soient endommagés et de leur permettre de glisser, sans encombres à l'intérieur des systèmes de guidage spécialement prévus, des traitements lubrifiants peuvent être appliqués à froid sur les produits après la recuisson. On utilise pour cela des substances non nocives, pour les aliments à base d'acide oléique et de polyéthylène, qu'on applique par vaporisation d'une solution aqueuse, diluée ou par contact avec les vapeurs. Ces traitements ne provoquent pas en général d'importants volumes d'émission.

Les traitements de surface à chaud, généralement une très fine couche d'oxyde d'étain ou d'oxyde de titane, peuvent être appliqués sur les emballages, immédiatement après le formage en machine. Ce traitement, avec le traitement lubrifiant à froid, aide à prévenir l'endommagement de la surface, pendant les manipulations successives. Le revêtement d'oxyde de métal sert de substrat, pour retenir les molécules organiques lubrifiantes, à la surface du verre, conférant au produit un niveau élevé de résistance aux rayures, qu'on peut obtenir par la simple utilisation de lubrifiants, non nocifs pour les aliments. Le traitement à chaud sert également à améliorer la résistance mécanique.

Ces traitements doivent être invisibles et la couche doit, par conséquent, être extrêmement fine. L'épaisseur du traitement de surface à chaud est généralement de  $< 0,01 \mu\text{m}$ . Afin d'obtenir des revêtements homogènes de cette épaisseur, le traitement est généralement appliqué par dépôt

chimique, en phase vapeur, Dépôt de Vapeur par voie Chimique, en utilisant les chlorures anhydres d'étain ou de titane, ou des composés organométalliques spéciaux. La vaporisation est également utilisée. La quantité de substances employée est, dans tous les cas, extrêmement faible, de l'ordre de 2 à 10 kg/jour par ligne de production, en fonction de la vitesse de production.

Après la fabrication, les emballages en verre peuvent parfois être soumis à un procédé secondaire de décoration et de personnalisation, avant l'envoi au client, par l'application d'étiquettes adhésives ou thermorétractables, ou par des décorations céramiques appliquées à chaud.

## 2.5 Verre plat

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Le terme verre plat inclut simplement tous les types de verre, ayant une forme plate, indépendamment du type de fabrication dont ils sont issus. Toutefois, aux fins du présent document, il est utilisé pour décrire le verre float et le verre coulé. La plupart des autres types de verre plat, faisant l'objet d'une production industrielle, rentrent dans le secteur des verres spéciaux, par exemple les plaques en vitrocéramique, ou bien leur volume de production est inférieur aux 20 tonnes/jour, indiquées dans la Directive 96/61/EC. D'autres méthodes de production de grandes quantités de verre plat, pour le bâtiment et l'automobile, sont considérées obsolètes dans l'UE. Ces produits sont généralement connus sous le terme de verre feuilleté, ou de glaces à vitrages, et sont brièvement décrits au chapitre 1. La majorité du verre plat est produit à partir d'une formule à base de carbonate de sodium, la composition typique du verre float figure au Tableau 2.5. Le verre float et le verre coulé sont presque exclusivement produits dans des fours régénératifs à brûleurs transversaux.

Composant	Pourcentage
Oxyde de silicium $\text{SiO}_2$	72,6
Oxyde de sodium $\text{Na}_2\text{O}$	13,6
Oxyde de calcium $\text{CaO}$	8,6
Oxyde de magnésium $\text{MgO}$	4,1
Oxyde d'aluminium $\text{Al}_2\text{O}_3$	0,7
Oxyde de potassium $\text{K}_2\text{O}$	0,3
Trioxyde de soufre $\text{SO}_3$	0,17
Matières premières secondaires, modificateurs de couleur et scories accidentellement contenues dans les matières premières	Traces

Tableau 2.5 : Composition habituelle du verre plat

### 2.5.1 Le procédé de float du verre

Le principe de base, du float du verre, consiste à verser le verre en fusion sur un bain d'étain en fusion, en formant un ruban, dont la surface supérieure et inférieure deviennent parallèles, en vertu de la force de gravité et de la tension de surface.

Le bain ou cuve de float est constitué d'un tube en acier, soutenu par un châssis en acier, et intérieurement revêtu de blocs de matériau réfractaire, contenant l'étain fondu. Le bac de float mesure environ 55 m à 60 m de long, 4 m à 10 m de large et il est réparti en 15 à 20 caissons. Le bain est étanche et une atmosphère légèrement réduite est maintenue à l'intérieur de celui-ci, par l'injection d'un mélange d'azote et d'hydrogène. Ceci est essentiel, afin d'éviter l'oxydation de la surface de l'étain, qui pourrait endommager le contact de surface extrêmement important entre le verre et l'étain. La fusion de l'étain est utilisée, en tant que liquide. Car c'est la seule

substance qui reste à l'état liquide, sans produire une pression de vapeur excessive, dans la plage de température requise.

Le verre en fusion coule du four, à travers une goulotte revêtue de matériau réfractaire, qui peut être réchauffée, pour maintenir le verre à la bonne température. Arrivé au bout de la goulotte, le verre fondu se déverse sur le bain d'étain, à travers une lèvre de coulée réfractaire spéciale, qui assure une bonne répartition du verre. Le flux de verre est contrôlé, à l'intérieur de la goulotte, par le biais d'un volet réglable suspendu, en matériau réfractaire, la tuile régulatrice. Lorsque le verre entre en contact pour la première fois avec l'étain, la température du métal est d'environ 1 000°C, et elle baisse ensuite jusqu'à 600°C à la sortie du bain. En passant sur la surface du bain, le verre adopte une épaisseur uniforme et devient presque aussi parfaitement plat que l'étain fondu.

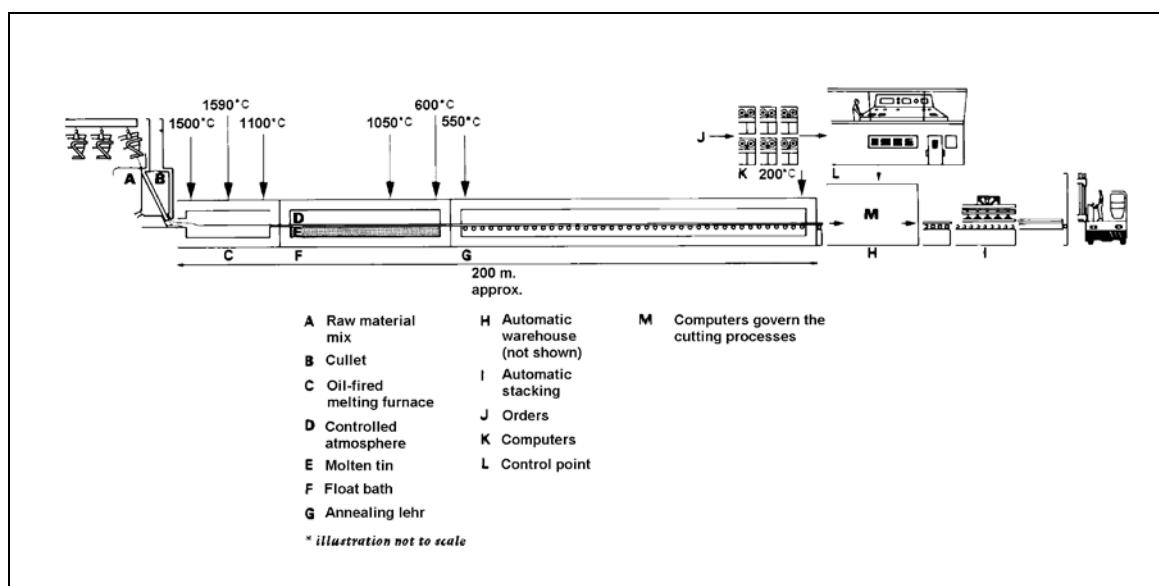


Schéma 2.6 : Le float du verre

A l'intérieur de la cuve de float il y a plusieurs couples de top rolls, refroidis à l'eau, dont l'orientation, la hauteur, la pénétration et l'angle sont réglables. Ces rouleaux saisissent la feuille de verre, par les deux bords, à l'aide de roues dentées, en l'étirant ensuite en longueur et en largeur. La vitesse d'écoulement du verre et les vitesses de rotation des cylindres contribuent à régler l'épaisseur du verre, en général entre 1,5 mm et 19 mm. Le verre possède une épaisseur naturelle maximum, sur la surface de l'étain, et des barrières de graphite peuvent être introduites, pour la production de verres plus épais.

A la sortie du bain de float, le ruban de verre est saisi par des rouleaux extracteurs qui l'introduisent dans un tunnel à température contrôlée, l'arche de recuisson, à l'intérieur duquel il est recuit. A l'entrée de l'arche de recuisson, du  $\text{SO}_2$  est vaporisé sur les deux côtés du ruban. Ce traitement de surface doit protéger le verre, pendant le contact avec les rouleaux. Le four de recuisson est divisé en plusieurs sections, à l'intérieur desquelles fonctionne le chauffage, ainsi qu'un système de refroidissement, par convection forcée et naturelle. La température du verre passe donc de 600°C à 60°C, afin de réduire les contraintes résiduelles, provoquées par le procédé de formage, à des niveaux acceptables. Cette opération demande du temps et de l'espace, au moment où le verre est versé sur la surface de l'étain et pendant les opérations de coupe, le ruban continu de verre mesure toujours 200 m.

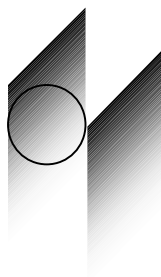
Le ruban de verre refroidi est ensuite coupé, sur la chaîne de production, par un dispositif de découpage mobile, l'angle de la lame, par rapport à la ligne, dépendant de la vitesse de la ligne, 90°, si elle est à l'arrêt. Les bords du ruban, qui portent des traces de rouleau, sont coupés et

recyclés, dans le four en tant que calcin. Ensuite les feuilles de verre sont vérifiées, emballées et stockées, pour la vente, ou en attendant des traitements secondaires.

Des revêtements peuvent être appliqués, sur la ligne de production, pour améliorer les performances du produit, entre autres pour les vitres à faibles émissions. Ce type de revêtement est limité à un certain type de production, et les usines dotées de ce genre d'équipements, pour le traitement en ligne, sont très rares. Le ruban de verre, en mouvement, est revêtu à chaud, par imprégnation de sa surface de composés de silice ou d'étain, qui réagissent en formant la pellicule nécessaire. Ce procédé se fait généralement en deux phases distinctes, une couche inférieure à base de silicium et une couche supérieure différente, par exemple de l'oxyde d'étain dopé à la fluorine. Les produits chimiques utilisés peuvent provoquer des émissions de gaz acides et de particules fines, qui sont généralement traitées, par un système de réduction spécifique.

### 2.5.2 Le procédé de production du verre coulé, verre imprimé et verre armé

Une représentation schématique du procédé de production du verre coulé est illustrée par le Schéma 2.7 ci-dessous.



**Schéma 2.7 : Le procédé de production du verre coulé**

Le verre coulé est obtenu grâce à un procédé continu à double cylindre. Le verre fondu à environ 1 000°C, est écrasé entre deux cylindres en acier, refroidis à l'eau, pour créer un ruban, doté d'une certaine épaisseur contrôlée, et d'un motif imprimé sur la surface.

Le verre est transféré du fondoir à verre dans un avant-creuset, afin d'atteindre la température requise, en amont du passage du cylindre. En fonction de la capacité du four et de la production souhaitée, on peut alimenter, à partir du même four, une ou deux machines. Les rouleaux tirent le verre en fusion, à l'intérieur du passage, d'où il ressort sous forme de ruban, d'une certaine

épaisseur, qui est définie par l'écart entre les rouleaux. La largeur moyenne du ruban est d'environ 2 mètres. En passant à travers les cylindres, refroidis à l'eau, la chaleur est extraite. Le contrôle de la température, à l'interface, est essentiel pour le bon fonctionnement du procédé et la qualité du produit fini. Lorsqu'il sort des cylindres, le ruban est visqueux, afin d'éviter un rétrécissement excessif et de pouvoir le transporter, au-dessus des cylindres en mouvement, sur environ 2 mètres. Puis, il est plus tard refroidi et transféré à l'intérieur de l'arche de recuisson, à une température d'environ 600°C.

Dans ce procédé, les cylindres remplissent trois fonctions distinctes, former le ruban, imprimer le motif choisi et extraire la chaleur. Les cylindres doivent être très soigneusement usinés et présenter une parfaite symétrie axiale et un motif uniforme sans aucun défaut, sur toute la surface du cylindre.

Il existe une grande variété de motifs. Ce qui nécessite de fréquents changements, afin de satisfaire la demande du marché. Par conséquent, l'un des éléments essentiels à prendre en compte, dans la conception des machines, est le remplacement rapide et aisé des cylindres d'impression. La solution la plus fréquente consiste à installer deux machines côte à côte, sur une lame d'aiguille. De cette façon, les nouveaux cylindres d'impression peuvent être montés sur la deuxième machine, en attendant d'être mis en place, lorsque le remplacement est nécessaire. Pour pouvoir effectuer cette opération, le flux de verre en fusion doit être bloqué, par une barre métallique, placée à l'intérieur de la goulotte, en amont des cylindres.

Le procédé de production du verre coulé a été également appliqué à la fabrication du verre armé, pour lequel on peut employer deux techniques différentes. Dans le premier procédé, deux goulottes sont utilisées, de façon à fournir à la machine de formage deux flots de verre en fusion. Tandis que dans la deuxième méthode un seul flux de verre et une seule goulotte sont nécessaires. Un grillage métallique est introduit dans la machine, par un cylindre placé au-dessus, et guidé à travers ce qu'on appelle le "coussin" de verre, formé par le verre dans l'espace entre deux cylindres. Les caractéristiques, le contrôle et le conditionnement du grillage métallique, ont une grande importance, pour la qualité du produit fini.

## 2.6 Fibres de verre à fil continu

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE, tm8 S2 3.03]

La composition la plus fréquemment utilisée, dans la production de fibres en fil de silionne est le verre E, qui représente plus de 98 % de la production du secteur. La composition habituelle du verre E figure au Tableau 2.6. D'autres types de composition sont également utilisés, pour la production de fibres de verre à fil continu, mais seulement en petite quantité dans l'UE. Les techniques de fusion employées, pour ces diverses formules, sont très particulières et ne sont pas représentatives en général des techniques employées généralement dans le secteur. Dans le cadre du présent document, seule la production de verre E est prise en compte.

Composant	Pourcentage
SiO <sub>2</sub>	53 à 60
Oxydes d'alcalis	< 2
Oxydes d'alcalis de terre	20 à 24
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 à 10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 à 16
ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0 à 3
F <sub>2</sub>	0 à 2
Oxyde de fer	< 1
Oxyde de zinc	0
Scories	<1

**Tableau 2.6 : Composition habituelle du verre E**

La fusion de verre, pour la production de fibres de verre à fil continu, est généralement réalisée dans des fours à récupération, à brûleurs transversaux, alimentés par du combustible fossile. On trouve également depuis peu en Europe, un certain nombre de fours oxycombustion. Les fours régénératifs, en revanche, ne sont pas utilisés, en raison de la taille relativement réduite des installations et du fait que, à la température développée dans les régénérateurs, la condensation de borate serait difficile à maîtriser. La formule de verre la plus fréquente, dans ce secteur et celle du verre E, à très faible contenu en alcalis et, donc, dotée d'une faible conductivité électrique. On considère actuellement que la fusion 100% électrique, du verre E, n'est pas viable d'un point de vue financier.

Le verre en fusion coule de la partie avant du four, à travers une série de goulottes, revêtues de matériau réfractaire, et réchauffées au gaz, jusqu'aux avant-creusets. Dans la base de chaque avant-creuset sont placés des coussinets qui permettent l'écoulement du verre. Les coussinets sont constitués d'une structure simple, en forme de boîte, dotée d'une plaque métallique, perforée à la base, avec plusieurs centaines de trous calibrés, plaquettes du coussinet. Le coussinet est chauffé à l'électricité, et sa température est réglée de manière homogène, sur toute la surface, afin d'obtenir une vitesse d'écoulement égale pour chaque trou.

Le verre en fusion, qui coule à travers les trous, est ensuite extrait et refroidi, par un dispositif de ventilation haute vitesse, afin de former des fils continus. En réglant avec précision la vitesse de traction linéaire, entre 5 m/s et 70 m/s, on peut obtenir des diamètres spécifiques, allant de 5µm à 24µm. Directement sous les coussinets, les fils de verre sont soumis à un fort refroidissement, par l'effet combiné de dérives métalliques refroidies à l'eau, d'une forte ventilation et d'eau vaporisée.

Les fils sont ensuite réunis et passent sur un cylindre ou une ceinture, destinés à appliquer un mélange aqueux, consistant généralement en une émulsion ou solution à base de polymères, sur chaque fil. Le revêtement est également appelé agglomérant, et sert à protéger les fils de l'abrasion, pendant la suite du traitement et la manutention, ou bien à fournir un renforcement aux polymères, qui assure une bonne adhésion des fibres de verre à la résine. L'agglomérant, contenu dans les fils, est généralement compris entre 0,5 % et 1,5 % du poids. La substance utilisée pour le revêtement varie en fonction de l'utilisation finale du produit. Les composants généralement utilisés sont des filmogènes, par exemple acétate de polyvinyle, amidon, polyuréthane, résine époxy, des agents adhésifs au silane, des modificateurs de pH, acide acétique, acide hydrochlorique, sels d'ammoniaque, et des lubrifiants, huiles minérales, tensioactifs.

Les fils ainsi revêtus sont réunis en faisceaux et soumis aux étapes suivantes du procédé, en fonction du type de renforcement qui a été effectué. Les faisceaux peuvent être soumis à un traitement traditionnel ou direct. Dans le traitement traditionnel, les faisceaux sont enroulés autour de l'arbre de rotation du bobinoir, pour former des "mottes", pouvant peser jusqu'à 50 kg. Les mottes contenant de l'agglomérant, jusqu'à 1,5 %, et de l'eau jusqu'à 15 %, sont étiquetées et transférées à une autre phase de fabrication. Pour certains types de produits, les mottes peuvent être traitées, lorsqu'elles sont humides. Mais en général, elles doivent passer dans des fours de séchage. Les fours sont chauffés au gaz, à la vapeur, à l'électricité ou, indirectement à l'air chaud. Les principaux produits sont la verranne, le stratifil, le matelas de verranne, les fils, les tissus et les fibres broyées.

Pour produire la verranne, on défait les mottes et on introduit les fils, dans une machine équipée d'un cylindre à lames rotatif. La longueur est généralement comprise entre 3 mm et 25 mm, et les fils sont ensuite emballés, dans différents types d'emballage, dont le poids peut atteindre 1 tonne. Pour fabriquer le stratifil, on défait et on combine les fils, provenant d'un nombre de mottes suffisant, pour obtenir le poids de verre souhaité par longueur.



Les matelas de verranne sont fabriqués en broyant des fils ou du stratifil, dans des hachoirs cylindriques. Les hachoirs sont disposés de façon à ce que les fils puissent être transférés sur un convoyeur en mouvement, de 3,5 m de large. Les fils sont ensuite vaporisés, avec un agglomérant secondaire, par exemple une solution aqueuse d'acétate de polyvinyle, ou une poudre de polyester saturée. Le contenu total d'agglomérant est compris entre 2 % et 10 %. Le convoyeur transfère le matelas humide, dans un four de séchage et de traitement thermique, puis le fait passer à travers un couple de compacteurs, avant de l'enrouler autour d'un arbre de rotation. Le matelas, qui peut avoir différentes densités et largeurs, est emballé en cartons, d'un poids moyen de 50 kg.

Les fils textiles sont produits à partir de mottes sèches ou humides, le séchage des fils ayant lieu pendant le tordage. Le fil est fabriqué sur une machine à tordre, pouvant recevoir jusqu'à 100 mottes, contenant toutes sortes de combinaisons de fils. Les fils sont réunis, tordus et enroulés autour d'une bobine. Il s'agit d'un procédé complexe, analogue à celui utilisé dans l'industrie textile. Généralement la machine à tordre produit une seule fibre, par fil de verre. Mais on peut également produire des fibres multiples, bien que cela soit plus rare.

Les tissus de fibres de verre sont obtenus par broyage des fils, dans des hachoirs cylindriques, pouvant alimenter directement un tritrateur, ou bien pouvant être collectés dans des conteneurs en vrac intermédiaires, dans l'attente d'être utilisés plus tard. Après avoir été dispersées à l'intérieur du tritrateur, les fibres passent sur un convoyeur, à grille métallique, où elles sont humidifiées. Une solution aqueuse, de différents types de résines, alcool de polyvinyle et latex, est ajoutée, en tant qu'agglomérant, jusqu'à un taux de 20 %, contenu sec. Puis le tissu passe dans un four de séchage et de traitement thermique, avant d'être enroulé autour d'un tambour. Le tissu de fibres de verre peut avoir différentes densités et largeurs.

Les fibres de verre broyées sont fabriquées à partir de mottes, ou de fils broyés, de longueur comprise entre 50 et 300  $\mu\text{m}$ . Les fibres broyées sont emballées, dans différents types de conditionnements, allant de 20 kg à 1 tonne.

La verranne, le stratifil et les matelas de fibres de verre à fil continu, peuvent être également produits par procédé direct. La verranne peut être fabriquée en introduisant directement les fils, après revêtement, dans un hachoir à haute vitesse. Les fils sont ensuite collectés et, en fonction de l'utilisation finale du produit, emballés humides ou bien séchés. Le stratifil peut être produit directement, en utilisant une plaquette de coussinet, munie d'un certain nombre de trous de différents diamètres, selon les produits. Les fils peuvent être revêtus et le stratifil séché, selon la procédure normale. Les matelas de fibres de verre, à fil continu, peuvent être fabriqués en plaçant les fils sur un convoyeur en mouvement, et en les vaporisant avec un agglomérant aqueux ou en poudre. Un dispositif spécial est utilisé, pour assurer le bon positionnement des fils sur le convoyeur. Le matelas est ensuite introduit dans un four de séchage et passé à travers des rouleaux compactants, avant d'être enroulé autour d'un arbre de rotation et emballé.

## 2.7 Gobeletterie

[tm27 Domestique]

Ce secteur est l'un des plus diversifiés, de l'industrie du verre, et comprend une gamme importante de produits et de procédés. Parmi ces derniers figurent des fabrications manuelles complexes d'objets en cristal au plomb décoratifs, et les fabrications en gros volumes, entièrement mécanisées, utilisées pour des articles à plus faible valeur ajoutée, grand public. La gobeletterie est généralement fabriquée à partir d'un verre sodocalcique, dont la formulation est proche de celle du verre d'emballage. Toutefois, les formules sont généralement plus complexes. Car les conditions requises, en matière de qualité, sont plus strictes et les procédés de formage plus variés. Tout comme pour le verre d'emballage, des agents colorants peuvent être ajoutés, dans le four ou dans l'alimentateur. Les principaux types de verres pour gobeletterie sont :

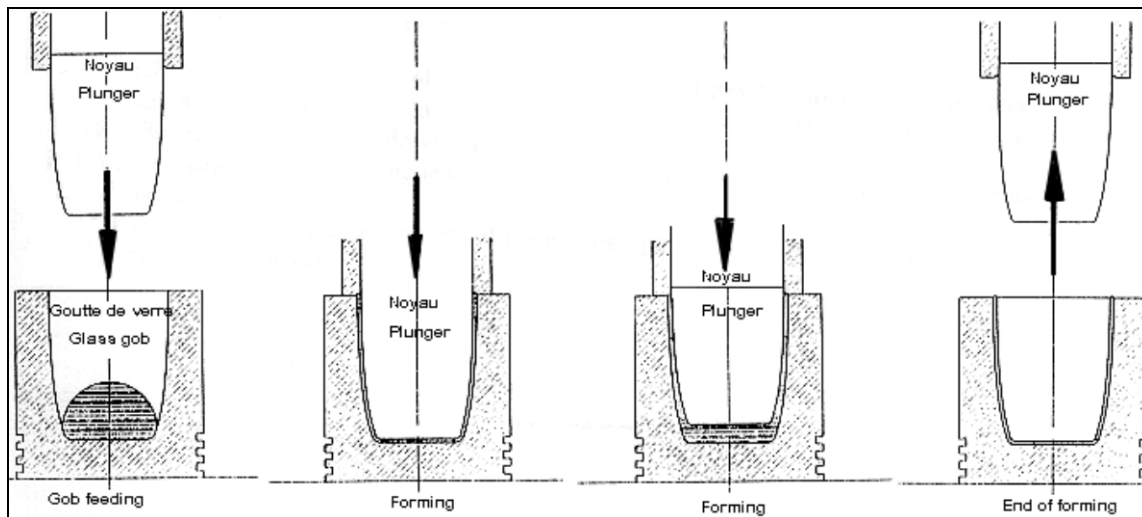
1. Le verre opale, opaque, contenant des fluorures ou des phosphates.

2. Le cristal au plomb 30%, 25% et le cristal, selon les définitions officielles, les formules et propriétés, indiquées dans la Directive 69/493/CEE.
3. Le verre au borosilicate contenant du bore, adapté surtout pour la fabrication d'articles de cuisine, en raison de son coefficient d'expansion thermique extrêmement faible.
4. La vitrocéramique pour articles de cuisine, dotée d'un coefficient d'expansion thermique encore plus bas.

Cette large gamme de produits et de procédés signifie que, presque toutes les techniques de fusion, décrites au paragraphe 2.3, sont susceptibles d'être utilisées, dans ce secteur, des fours à pots, aux grands fours régénératifs. Contrairement à ce qui se passe dans la production d'emballages, le calcin extérieur n'est pas très largement utilisé, en raison de contraintes quantitatives. Tandis que le calcin recyclé, provenant de la production, est couramment employé.

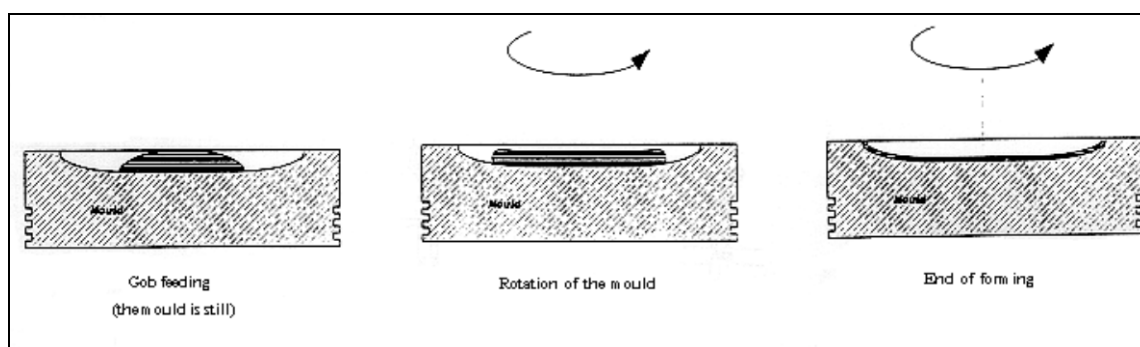
Les procédés de formage rentrent dans deux catégories principales, le traitement automatisé et la fabrication manuelle ou semi-automatique. Le traitement automatisé est très proche de celui utilisé dans le secteur de production du verre d'emballage. Le verre provenant du four est introduit, à travers un ou plusieurs avant-creusets, dans la machine de formage, où les articles sont formés, à l'intérieur de moules. La technique de formage dépend des dimensions du produit à fabriquer. Les quatre techniques primaires sont le pressé-soufflé, le soufflé-soufflé, la compression et le filage. Le pressé-soufflé et le soufflé-soufflé sont essentiellement identiques aux techniques utilisées pour le secteur du verre d'emballage. Nous n'allons donc pas les décrire ici. En revanche, la structure des machines et les conditions d'exploitation sont différentes, vitesse, conditions requises en matière de qualité.

Le procédé de formage est assez simple, et il est utilisé pour des articles relativement creux, dont l'ouverture est plus large que la base, ou de la même largeur que celle-ci. Cela consiste à presser un paraison de verre chaud, entre un moule et un piston. La température du verre varie, en fonction de la composition. Pour le verre sodocalcique, elle est en moyenne de 1150 °C.



**Schéma 2.8 : Le procédé de compression pour le moulage d'articles de verre**

Le procédé de filage est utilisé pour la production d'articles de forme circulaire, tels que des plats et des bols. On verse dans le moule un paraison de verre chaud, puis on fait tourner le moule, et l'article est formé par l'application de la force centrifuge.



**Schéma 2.9: Le procédé de filage pour le moulage d'articles de verre**

Les articles moulés sont généralement polis au feu, afin d'obtenir la qualité de surface requise. Des températures très élevées sont parfois nécessaires. Elles sont généralement assurées par l'alimentation oxycombustion ou, dans certains cas, par des fours à l'oxygène et à hydrogène. Ces procédés présentent l'avantage d'une faible consommation d'énergie, d'une utilisation simple et d'une bonne réduction des volumes de gaz d'échappement. Après la cuisson, les articles passent dans une arche de recuisson et sont prêts à recevoir un revêtement de surface. La recuisson et l'application du revêtement à froid sont analogues à celles pratiquées dans la fabrication du verre d'emballage et ne sont donc pas décrites ici, de façon plus détaillée. Dans certains cas, les articles ne passent pas dans une arche de recuisson, mais dans un four de trempe qui en augmente la résistance aux chocs mécaniques et thermiques. La production de certains articles comporte l'assemblage séparé de deux ou plusieurs pièces, après une refusion locale. Ceci s'applique aux tiges et aux pieds des verres, ainsi qu'aux anses des tasses. Ces éléments sont généralement fabriqués séparément, par compression, étirement ou extrusion. Les tiges des verres à pied sont souvent obtenues par étirement, à partir du corps du verre, et seule la base est rajoutée, dans un deuxième temps.

Pour les articles faits main, le verre en fusion est collecté par un opérateur, muni d'une canne creuse, directement dans le four ou dans le dispositif d'alimentation. En soufflant légèrement à l'intérieur de la canne, on obtient une petite masse creuse, le paraison, qui est ensuite formée par tournage, dans un moule en bois ou en métal. Les objets sont ensuite introduits dans une arche de recuisson, afin d'éliminer les éventuelles contraintes internes, puis polis au feu et réchauffés encore une fois. Dans la production semi-automatique, certaines étapes du procédé collecte, formage et manutention, sont réalisées par des machines ou des robots. En règle générale, la fabrication manuelle ne rentre dans le cadre de la PCIP que lorsqu'elle est réalisée dans des installations où d'autres types de fabrication ont également lieu.

Une fois terminée la phase de production de base, les articles peuvent être soumis à une ou plusieurs opérations de finition à froid, dont certaines sont décrites ci-dessous.

Par la découpe, des motifs sont gravés sur le verre vierge, à l'aide de meules diamantées. Cette opération peut être exécutée manuellement ou de façon automatisée, selon le type de produit. L'eau, parfois mélangée à des lubrifiants, etc., est utilisée pour le refroidissement et pour l'élimination des fines particules de verre, générées par le procédé. L'eau est traitée, puis éliminée ou recyclée. Les bords des objets sont parfois meulés et polis, avec des techniques similaires, mais moins spécifiques.

La découpe rend la surface du verre grise et irrégulière. Pour redonner à la surface du verre son aspect d'origine, on la trempe dans un bain de polissage, d'acide fluorhydrique et sulfurique. Les acides polissent la surface, car les zones irrégulières se dissolvent plus rapidement, à cause de leur surface plus importante. Une pellicule blanche, composée de sulfate de plomb, se forme alors sur la surface du verre. Le verre est ensuite rincé, à l'eau chaude et récupère ainsi son éclat.

Des vapeurs de HF et SiF<sub>4</sub> se dégagent, de la surface du bain de polissage. Ces vapeurs sont traitées dans des tours d'épuration. Cette opération provoque la formation d'acide hexafluorosilicique, H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, avec des concentrations moyennes de 35 %, et l'eau acide est ainsi neutralisée. Autre possibilité, on peut récupérer l' H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> et, si possible, l'utiliser en tant que charge d'alimentation, dans l'industrie chimique. L'eau de rinçage acide nécessite également une neutralisation périodique. Des techniques alternatives au polissage à l'acide sont en cours de développement, entre autres le polissage mécanique et le polissage à haute température, à la flamme ou au laser.

De nombreuses techniques peuvent être utilisées, pour créer des motifs, entre autres la décoration à l'émail, le dépolissage par sablage ou mordant acide et la gravure. Les volumes des émissions de ces procédés sont limités, par rapport à ceux générés par les principales opérations de fabrication.

## 2.8 Verres spéciaux

[tm25 Spécial, tm1 RUDoE, tm21 Schott]

Le secteur de production des verres spéciaux est extrêmement varié et couvre une grande gamme de produits, de composition, de méthodes de fabrication et d'utilisation finale très différentes. Certains produits pourraient être considérés communs à d'autres secteurs de production, en particulier la gobeletterie, pour les verres au borosilicate. Le verre pour tubes cathodiques et le verre au borosilicate représentent 70 % de la production de verres spéciaux, la majorité des autres produits ont des volumes de production relativement faibles, qui se situent souvent très en dessous de la valeur limite d'émission de 20 tonnes/jour. Toutefois, une grande partie de ces produits, à faible volume est fabriquée dans des usines dont la production générale dépasse largement ce chiffre. Le Tableau 2.7 indique la composition des principaux types de verre. Ce paragraphe traite des principales méthodes de fabrication, employées dans ce secteur.

La grande diversité de ce secteur donne lieu à l'utilisation de plusieurs techniques de fusion différentes. Toutefois, les faibles volumes de production indiquent que la majorité des fours sont relativement petits. Les techniques les plus courantes sont les fours à récupération, les fours oxycombustion, les fours électriques et les réservoirs journaliers. Dans certains cas, les fours régénératifs sont également utilisés, par exemple pour la fabrication du verre pour tubes cathodiques et du silicate de sodium. Les températures de fusion, des verres spéciaux, peuvent être parfois plus élevées, que pour des compositions traditionnelles, de produits à gros volume. En particulier, le verre pour tubes cathodiques, le verre au borosilicate et la vitrocéramique qui emploient des températures de fusion supérieures à 1650°C. Ces hautes températures et ces formules complexes peuvent provoquer des volumes d'émission plus importants, par tonne que par exemple le verre sodocalcique. Les faibles volumes de production, associés à de hautes températures, indiquent également que le rendement thermique est généralement faible et que la durée de vie des fours est plus courte, dans ce secteur que dans d'autres.

En raison du haut niveau de qualité, requis par certains types de produits, tels que les verres optiques et la vitrocéramique, il faut construire ou revêtir les composants, à partir de la phase de finition, avec du platine, pour éviter la contamination.

Tout comme dans les autres procédés de production, après la fusion et la finition, le verre en fusion coule directement du four, à travers des avant-creusets, à température contrôlée, à l'intérieur des équipements de formage situés en aval. Les principales techniques de formage employées dans le secteur sont :

- a) Procédé pressé-soufflé, verre au borosilicate, vaisselle et articles de cuisine.
- b) Moulage par carrousel, verre au borosilicate, lampes.
- c) Compression, verre au borosilicate, verre pour gobeletterie.
- d) Verre coulé, vitrocéramique, verre plat.
- e) Pression, verre pour tubes cathodiques et lampes.

- f) Procédé en ruban, ampoules.
- g) Filage, verre au borosilicate.
- h) Extrusion, procédé Danner et Vello, tubes de verre y compris pour éclairages.
- i) Coulage, verres optiques et certains produits spéciaux.
- j) Etirement, vers le bas pour verre très fin tel que le verre pour écrans, vers le haut pour verre au borosilicate
- k) Flottage, pour verre au borosilicate,
- l) Dissolution, silicate de sodium.

Le procédé pressé-soufflé et soufflé-soufflé est le même que celui décrit pour le secteur du verre d'emballage. Le procédé de production du verre coulé, utilisé pour des articles tels que les plaques en vitrocéramique, pour cuisinières, est une version réduite du procédé décrit pour le secteur du verre plat, mais avec des cylindres simples. Ces procédés ne sont pas décrits ici, voir les précédents paragraphes

Dans le procédé par pression, le verre est en contact avec toutes les pièces du moule métallique. Le moule de pression comprend trois pièces, le moule creux, un piston qui s'adapte au moule en laissant un espace qui détermine l'épaisseur de la paroi de verre, et une bague de serrage, qui guide le piston pour sortir du moule. On introduit dans le moule un paraison, qui est ensuite pressé, par voie hydraulique ou pneumatique, par le piston guidé par la bague, jusqu'à ce que le verre recouvre toutes les parties du moule. Le piston et le moule absorbent une bonne partie de la chaleur du verre et, une fois le verre solidifié, le piston est retiré. La plupart des machines de pression possèdent des tables tournantes, équipées de moules, entre 4 et 20 moules, maximum 32, le plus souvent, 11 pour le verre pour tubes cathodiques. La table tournante guide le verre, étape par étape, du chargement, à la pression, du refroidissement à l'extraction.

Les ampoules peuvent être produites par le procédé "à bande", consistant à former une bande de verre, par la compression d'une masse de verre fondu, entre deux cylindres refroidis à l'eau. Une fois sortie des cylindres, la bande de verre passe, à l'intérieur de la machine, à travers une série de diaphragmes, formant une chaîne continue perforée. Au fur et à mesure que la bande de verre avance, la chaîne continue entre en contact avec une série de têtes de soufflage, placées au-dessus, dont chacune coïncide avec l'un des trous de la chaîne. Le verre, poussé à l'intérieur du trou par l'air soufflé par la tête de soufflage, prend la forme d'une ampoule à l'intérieur d'un moule à carrousel, qui vient s'enfermer autour du verre, par en haut. En avançant sur la bande, l'ampoule est extraite du moule, refroidie à l'air puis sortie de la bande et transférée sur un convoyeur. Le convoyeur introduit les ampoules dans une galerie de recuit, en les transférant ensuite vers les systèmes de refroidissement, de vérification et d'emballage. On peut atteindre, avec cette méthode, des vitesses de production de 1 000 ampoules/minute.

L'extrusion peut être utilisée pour les verres dotés d'une courbe de viscosité élevée, ou bien pour les verres qui tendent à cristalliser, afin de produire des articles dotés de tolérances dimensionnelles très strictes. Une méthode économique consiste à fabriquer différents types de formes pleines ou creuses, avec des sections à arête vive, pour usage industriel. Par l'application de différentes méthodes d'extrusion des stratifiés, on peut combiner deux ou trois types de verre, pour produire, entre autres, des composants revêtus de verre, résistant aux agents chimiques.

La technique la plus largement utilisée, pour l'étirage continu de tubes de verre, est le procédé Danner. Un fil continu de verre en fusion coule sur un noyau réfractaire légèrement incliné, qui tourne lentement et qui est appelé mandrin de Danner. A l'extrémité inférieure du mandrin se forme une petite masse creuse, à partir de laquelle le tube est étiré. On souffle ensuite de l'air, à travers l'arbre creux du mandrin, pour garder un espace creux, à l'intérieur du verre. Après avoir été replacé en sens horizontal, le tube en cours de solidification est transféré, par un transporteur à rouleaux, vers la tireuse, derrière laquelle il est ensuite coupé en segments de 1,5 m de long, ou parfois plus longs. Ces machines peuvent produire plus de 3m /seconde de tubes de verre.



Le procédé Vello est l'autre méthode la plus fréquemment utilisée et permet d'atteindre pratiquement la même vitesse de production, que le procédé Danner. Le verre, provenant du four, coule à travers les avant-creusets et vers le bas, à travers un orifice, la bague, l'espace creux à l'intérieur du verre étant maintenu, grâce à une canne dotée d'une ouverture conique, la cloche, située à l'intérieur de la bague. Le tube encore souple est replacé, en sens horizontal, puis transporté sur un convoyeur à rouleaux, refroidi et découpé, tout comme dans le procédé Danner.

L'une des variantes du procédé Vello est le procédé d'étirage, par le bas, qui peut être employé pour la production de tubes, d'un diamètre supérieur à 360 mm. Le verre est étiré vers le bas, à travers une chambre à dépression, et passe à travers un obturateur à iris, qui peut être réglé sur différents niveaux d'ouverture. Un quatrième procédé est celui d'étirage par le haut, où le tube de verre est étiré vers le haut, à partir d'une cuvette tournante. La zone de traction est protégée par un cylindre tournant, en céramique, dont l'une des extrémités est immergée dans le verre en fusion. L'espace creux est formé à l'aide d'un jet d'air, placé sous la surface du verre. Cette technique est particulièrement adaptée à la production de tubes de gros diamètre, dotés de parois épaisses.

Le verre optique peut être fondu en blocs, ou bien extrudé à l'intérieur de cylindres, pour fabriquer des moules ébaucheurs, qui sont ensuite commercialisés, pour être transformés. Les moules sont généralement fabriqués avec des matériaux réfractaires.

Le silicate de sodium, Si:Na, rapport 2 – 3,5, est obtenu en faisant fondre du sable et du carbonate de sodium à l'intérieur d'un four à combustible fossile. Un dérivé, le silicate de potassium, peut être obtenu à partir du carbonate de potassium. Le four ressemble à un four traditionnel et peut être du type à récupération ou régénératif, selon sa taille. Ce type de four est généralement plus court qu'un four traditionnel, le temps de séjour du verre dans celui-ci étant également moins long, en raison du fait que l'affinage du verre n'est pas nécessaire. Le verre en fusion coule à partir de l'extrémité du four, les avant-creusets ne sont généralement pas nécessaires, pour être immédiatement refroidi, par contact direct avec l'eau ou avec un transporteur refroidi à l'eau. Le verre peut être commercialisé sous une forme solide, mais, le plus souvent, on le dissout dans l'eau à haute température et avec une pression élevée, afin d'obtenir une solution. Le verre est seulement faiblement soluble, en présence de la pression atmosphérique.

Le silicate de sodium peut être également fabriqué par un procédé hydrothermique, par la dissolution directe du sable en hydroxyde de sodium, afin d'obtenir une solution de silicate de cristal au plomb, en une seule étape précisément maîtrisée. La réaction a lieu dans des autoclaves, spécialement conçus pour résister à des conditions extrêmes. Bien que ce procédé ne soit pas considéré comme un procédé de production du verre, il peut être pris en considération, dans le cadre d'une autorisation d'exploitation pour une installation comprenant les deux activités.



Matériau	Verre pour téléviseurs		Tubes de verre		verre aux borosilicates, par exemple verre pour appareils chimiques	Autres verres pour éclairage		Vitrocéramique	Verre au quartz	verre optique		Autres par exemple Diodes	Silicates a, Silicate de Na b, Silicate de K
	Ecran	Tube	Alcalis de terre	Borosilicates		Verre opaque	Ampoules			couronne au bore	Couronne à la fluorine		
SiO <sub>2</sub>	60 à 63	53 à 55	70	70 à 81	70 à 81	67,5	73 à 75	60 à 64	99,9	61,7		35	66 à 88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 à 3,4	1 à 5,2	4	2,3 à 5,5	2,3 à 5,5	5	1 à 4	10 à 20	0,005	0,3 à 3,0	15		0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0,01 à 0,03	0,01 à 0,03	0,15							0,03
CaO	0 à 3,2	0,9 à 3,8	4	0,01 à 1	0,01 à 1	9,4	0,5	0,5 à 7,0	0,001	0 à 3,0			0,008
PbO		21 à 23										60	<0,0002
MgO	0 à 1,2	0,6 à 2,2	2	0,01 à 0,5	0,01 à 0,5		0,5	0,0 à 1,0	0,001				0,008
Na <sub>2</sub> O	6,6 à 9,4	5,8 à 6,7	12,5	3,5 à 6,5	3,5 à 6,5	13,6	3 à 4	0,5 à 10	0,001	0 à 5,0			20 à 34(a)
K <sub>2</sub> O	6,6 à 8,4	7,8 à 8,1	2,5	0,5 à 1,5	0,5 à 1,5	1,8	1,5 à 2,5			12 à 18		5,0	27 à 32(b)
SO <sub>3</sub>						0,2							0,015
F						4,0					35		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			1	8 à 13	8 à 13		12 à 17			6 à 20			
BaO	8,3 à 13	0 à 2,5	4					1,0 à 2,0		0 à 10	20		
ZnO								0,5 à 6,0					
SrO	2,2 à 8,8	0 à 0,5											
ZrO	0 à 2,3	0 à 0,2		0,01 à 1	0,01 à 1			1 à 2,0					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>											20		
LiO <sub>2</sub>								3,0 à 4,0					
TiO <sub>2</sub>				0,01 à 5	0,01 à 5			1,5					

**Tableau 2.7: Composition chimique des principaux produits du secteur des verres spéciaux**

Certaines compositions de verre variant énormément d'un produit à l'autre, les chiffres indiqués ci-dessus sont fournis uniquement à titre indicatif.

## 2.9 Laine minérale

[tm26 EURIMA, tm8 S2 3.03]

La fabrication de la laine minérale comprend la préparation des matières premières, la fusion, le fibrage du verre fondu, l'application de l'agglomérant, la formation du matelas, le traitement thermique, le refroidissement et la finition du produit. La laine minérale peut être divisée en deux catégories principales la laine de verre et la laine de pierre ou laine de laitier, coton minéral. Ces produits sont essentiellement utilisés pour les mêmes applications et diffèrent surtout pour les matières premières et les méthodes de fusion employées. Après la phase de fusion, les procédés, ainsi que l'impact sur l'environnement, sont essentiellement identiques. Les formules caractéristiques de la composition de la laine minérale figurent au Tableau 2.8 ci-dessous.

Laine minérale	SiO <sub>2</sub>	Oxydes alcalins	Oxydes d'alcalis de terre	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxydes de fer	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Laine de verre	57 à 70	12 à 18	8 à 15	0 à 12	<0,5	0 à 5	Trace	0 à 3
Laine de pierre	38 à 57	0,5 à 5	18 à 40	Trace	0,5 à 12	0 à 23	0,5 à 4	0 à 3
Laine de laitier	38 à 52	0,5 à 3	30 à 45	Trace	0 à 5	5 à 16	<1	Trace

Tableau 2.8 : Composition habituelle de la laine minérale

### 2.9.1 Laine de verre

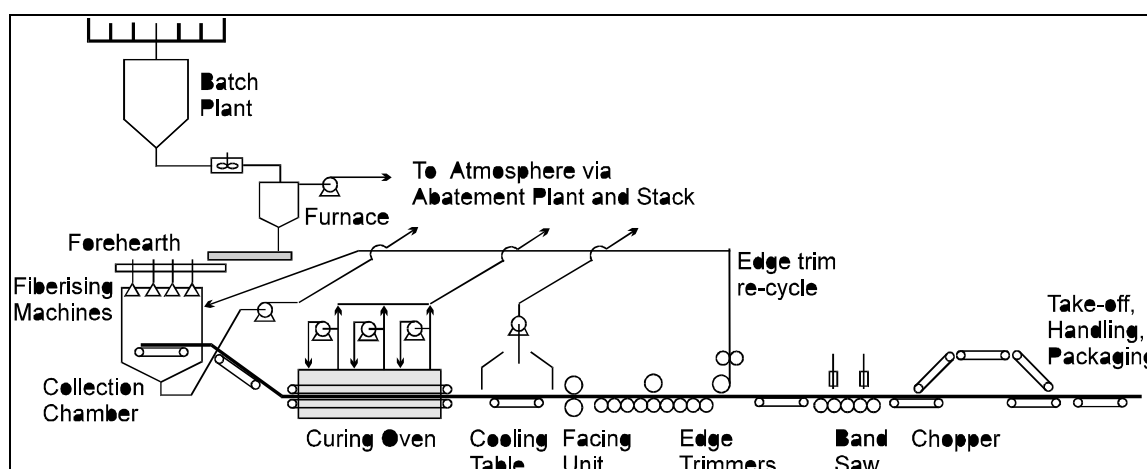


Figure 2.10 : Installation de production de laine de verre

Les matières premières, employées pour la fabrication de la laine de verre, sont généralement livrées par camion citerne et transférées, par voie pneumatique dans les trémies de stockage. Chaque type de procédé emploie une gamme de matières premières, si bien que la composition peut varier considérablement d'un procédé à l'autre. Parmi les matériaux de base, utilisés pour la fabrication de la laine de verre, figurent le sable, le carbonate de sodium, la dolomite, le calcaire, le sulfate de sodium, le nitrate de sodium, ainsi que des minéraux contenant du bore et de l'alumine.

Dans la plupart des procédés, on utilise également le calcin comme matière première. Il s'agit de verre broyé, qu'on obtient en trempant le verre en fusion, sortant du four, dans de l'eau, lorsque

le fibrage a été interrompu. Le calcin issu de la fabrication, qui possède la même formule que le produit final, est ensuite immédiatement recyclé dans le procédé de production. D'autres types de calcin, par exemple le calcin provenant des bouteilles et des miroirs, sont de plus en plus souvent utilisés, en tant que charges d'alimentation. Ce type de matériau est beaucoup plus difficile à recycler et son utilisation dépend en grande partie de son coût, de sa composition, de sa pureté et de la possibilité d'obtenir un approvisionnement régulier. De nombreux fabricants recyclent également des déchets fibreux et des poussières, provenant du flux des gaz d'échappement du four.

La nature fibreuse de la plupart des déchets en rend impossible le recyclage, sans transformation préalable. Les matières premières sont chargées, sous la forme de poudre ou de granulés, ce qui fait que les déchets doivent être broyés ou réduits, en grains avant d'être chargés dans les fours. Cela provoque généralement des opérations de moulage. Les produits constituant les déchets, ainsi que les déchets filtrés contiennent un taux significatif d'agglomérants organiques. Dans un fondoir à verre, le contenu en carbone des déchets pose un certain nombre de problèmes concernant la diminution de la transmission de chaleur, l'écumage, la déstabilisation des conditions de fusion et la modification de la structure chimique du four. Ces problèmes peuvent être partiellement résolus, mais la quantité de déchets, pouvant être recyclés, à l'intérieur du four reste limitée. Parfois, il peut être également nécessaire d'ajouter du nitrate de sodium ou de potassium, en tant qu'agent oxydant et la décomposition de ces substances, peut faire augmenter de manière significative les émissions d'oxydes d'azote.

Les différentes matières premières sont pesées et mélangées automatiquement pour obtenir une composition parfaitement équilibrée. La composition, une fois mélangée, est ensuite transférée dans une trémie de stockage intermédiaire, avant d'être chargée dans le four.

A de rares exceptions près, le four sera de type électrique, ou bien à récupération au gaz, ou moins souvent du type oxycombustion. Toutes ces techniques sont décrites au paragraphe 2.3 ci-dessus.

Le verre en fusion coule, en partant du four, à travers un avant-creuset chauffé intérieurement, revêtu de matériau réfractaire, et passe à travers une série de coussinets, à un seul orifice, généralement de un à dix, dans des filateurs rotatifs centrifuges spécialement conçus à cet effet. Le premier fibrage est obtenu à l'aide du filateur rotatif, le matériel est ensuite soumis à atténuation par des flammes de gaz chaud, émises par un brûleur circulaire. On obtient ainsi un voile de fibres, de longueurs et de diamètres différents, entrelacées de façon aléatoire. Le voile passe ensuite à travers une série de vaporisateurs, qui enduisent les fibres d'une solution d'agglomérant, à base de résine phénolique et d'huile minérale, afin d'assurer la solidité, l'élasticité, la résistance et la qualité marchande du produit fini.

Les fibres, revêtues de résine, sont ensuite transférées, par aspiration sur un transporteur, sur lequel elles prennent la forme d'un matelas de fibres. Ce matelas est ensuite chargé, dans un four au gaz, à une température d'environ 250°C, où a lieu le séchage du produit et le traitement thermique de l'agglomérant. Le produit est ensuite refroidi à l'air et coupé, à la taille souhaitée avant l'emballage. Les rives peuvent être réduites en granulés et réinjectées par soufflage, dans le voile de fibres, ou bien elles peuvent être mélangées à des produits excédentaires, pour former de la laitier. Certaines produits ne nécessitent pas de traitement thermique, entre autres les produits traités aux micro-ondes, les produits pressés à chaud, les produits non polymérisés et les produits ne contenant pas d'agglomérants. Certains produits stratifiés sont obtenus par l'application d'un revêtement, par exemple les feuilles d'aluminium ou les textiles de verre, sur lesquels un produit adhésif est appliqué directement, sur la chaîne de fabrication.

De l'eau est vaporisée à l'intérieur de la plupart des gaines, utilisées dans le procédé de fabrication en aval, afin de prévenir la formation de fibres et de matières résineuses qui pourraient être à l'origine d'incendies ou de blocages, et afin d'éliminer les substances inutilisées, provenant des gaz de combustion. L'eau est également utilisée, pour nettoyer le transporteur, ainsi que d'autres parties de l'installation. Le système, de traitement des eaux de fabrication, est généralement à circuit fermé, l'eau est collectée, filtrée et réutilisée, pour la vaporisation des gaines, le nettoyage

et la dilution des agglomérants. Un système typique, de traitement des eaux de procédé, est illustré par le schéma 2.11 ci-dessous.

On peut produire toute une série de produits dérivés, à partir des fibres de verre, entre autres de la laine isolante granulaire, de la laine non polymérisée, emballée pour transformation ultérieure, ainsi que des produits stratifiés ou revêtus. Les produits isolants pour tubes constituent un dérivé important, qu'on fabrique généralement en détournant de la laine non polymérisée du procédé de fabrication principal, pour la mouler ensuite, sous pression et la soumettre au traitement thermique. Par ailleurs, la laine peut être enroulée autour de mandrins chauffés, escamotables, pour former l'âme du produit, puis soumise au traitement thermique, afin de créer la paroi externe, avant d'être transférée à la phase de durcissement.

L'agglomérant est préparé en mélangeant la résine, partiellement polymérisée, avec certains additifs, afin d'améliorer l'application, de mieux faire adhérer la résine à la laine, d'éviter la formation de poussières, de conférer au produit une bonne résistance à l'eau et de favoriser la dilution de l'agglomérant. Une quantité d'eau considérable est nécessaire pour diluer l'agglomérant, de l'eau de procédé, si disponible, avant d'appliquer celui-ci sur le voile.

La résine, la plus couramment utilisée, est un produit thermodurci, à base de phénol, de formaldéhyde et d'un catalyseur. La résine est à base aqueuse et contient généralement jusqu'à 50 % de produit solide. Une description plus détaillée, de la structure de l'agglomérant, figure au Chapitre 4. La résine peut être fournie par des fabricants spécialisés, ou bien directement fabriquée sur le site, par le producteur de laine minérale. La résine, produite sur le site, est généralement obtenue par un procédé de composition, où on fait réagir les matières premières, à température contrôlée, afin d'obtenir le degré souhaité de polymérisation et de solides. La fabrication de résine est considérée comme un procédé chimique et n'est, donc, pas traitée dans le présent document.

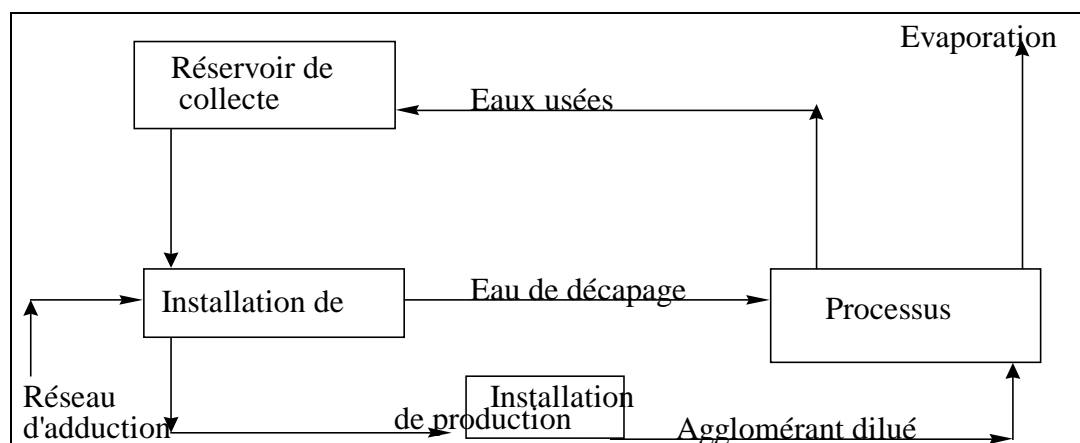
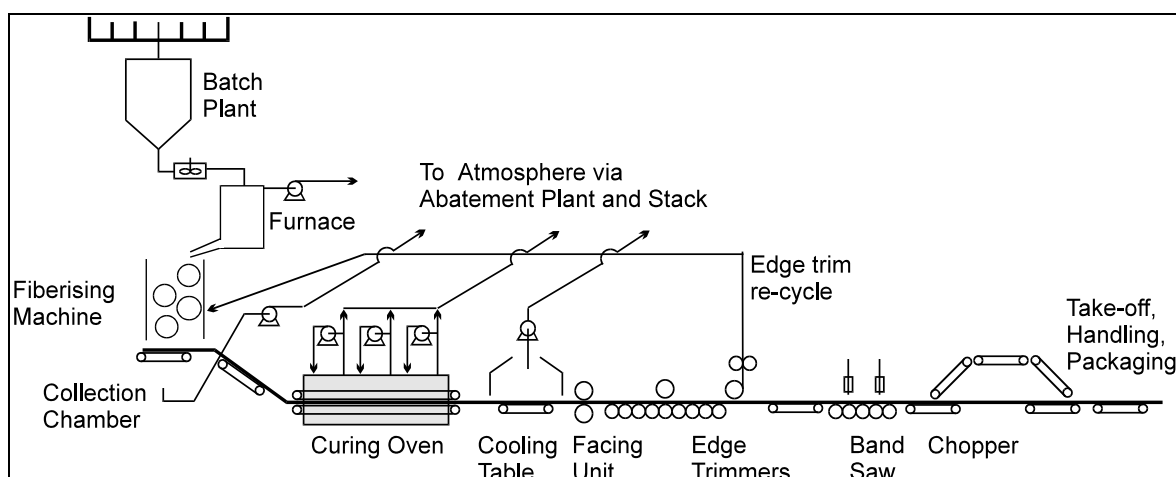


Schéma 2.11 : Exemple de circuit de traitement des eaux dans la production de la laine minérale

### 2.9.2 Laine de roche



**Schéma 2.12 : Exemple d'installation de fabrication de laine de roche**

La laine de roche est traditionnellement fabriquée par la fusion d'un mélange de roches silico-alumineuses, généralement du basalte, de scories, de calcaire et de dolomite. La composition peut également contenir des déchets, provenant de la fabrication ou de la consommation. La technique de fusion la plus utilisée est le cubilot à charbon. Le cubilot a une enveloppe cylindrique en acier, qui peut être revêtue à l'intérieur de matériau réfractaire, dont le fond est fermé. Toute la surface du four est refroidie à l'eau, par le biais d'une boucle d'eau de refroidissement, par convection.

Les matières premières et le charbon sont chargés, par la partie supérieure du four, par couches alternées, parfois elles sont également mélangées. L'air, quelques fois enrichi à l'oxygène, est introduit dans la zone de combustion du cubilot, à environ 1 à 2 mètres du fond. Il s'agit là de la partie la plus chaude du cubilot, où la température peut atteindre environ 2 000°C. Le matériau en fusion est collecté, sur le fond du four et coule ensuite, à travers une goulotte et le long d'un court chenal de coulée, positionné au-dessus de la fileuse. Le basalte et, en plus petites quantités, les scories, contiennent du fer, sous la forme de  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$ . Dans certaines parties du cubilot, soumises à réduction, le minerai de fer est transformé, par réduction en fer métallique. Ce fer se dépose sur le fond du cubilot et pourrait endommager la fileuse, une machine extrêmement coûteuse, s'il formait une masse, à l'endroit où il a coulé, à travers la goulotte. Afin d'éviter cet inconvénient, le fer est régulièrement drainé en perçant la partie inférieure de la base courbe du cubilot.

Dans les cubilots à vent chaud, les matières poussiéreuses ou fibreuses, qui ne seraient pas évacuées à travers la partie supérieure du cubilot, pourraient avoir un effet négatif, sur la porosité du lit, en interrompant le flux d'air. La solution la plus répandue, pour ce problème, consiste à rectifier et à produire des briquettes, d'une taille comparable à celle d'autres matières premières. Le ciment est généralement utilisé comme liant, pour les briquettes. Mais cela peut provoquer une augmentation du volume d'émission de dioxyde de soufre, à cause du soufre contenu dans le ciment. Toutefois, l'utilisation de briquettes comporte d'autres avantages, entre autres, une consommation d'énergie moins importante et la possibilité d'ajouter à la composition d'autres matériaux fins, en particulier des déchets comme le sable de fonderie.

Le matériau en fusion coule sur les roues de la fileuse qui tournent rapidement, pour être ensuite éjecté, en formant un fin brouillard, qui génère les fibres. L'air est soufflé derrière les roues, afin de refroidir les fibres et de les guider vers le convoyeur, sur lequel elles vont former un matelas. Une solution aqueuse, de résine phénolique, est ensuite appliquée sur les fibres, par une série de gicleurs, placés sur la fileuse. Le convoyeur est soumis à une forte aspiration, qui exerce trois fonctions différentes. Elle pousse les fibres sur le convoyeur, elle extrait l'air pollué de la chambre de fibrage et aide à distribuer, de façon homogène, la solution phénolique sur tout le matelas. La résine phénolique sert à renforcer les fibres et à leur donner forme, tout comme dans la fabrication des produits isolants, en fibres de verre. Le matelas principal est stratifié, pour obtenir la masse

requisse par unité de surface. On peut également appliquer un procédé long de formage, en chambre, grâce auquel on peut obtenir, en une seule phase, le poids requis pour le produit. Mais cela est plus rare.

Le matelas passe ensuite dans un four à combustible fossile, à une température d'environ 250°C, afin de régler l'épaisseur du produit, de le sécher et de soumettre l'agglomérant au traitement thermique. Le produit est ensuite refroidi à l'air et coupé à la taille requise, avant l'emballage. Les revêtements isolants pour tubes, ainsi que d'autres produits secondaires, peuvent être fabriqués en employant le même procédé, décrit pour la laine de verre au Paragraphe 2.9.1.

On peut vaporiser de l'eau à l'intérieur des conduits, afin d'éviter la formation de résines et de fibres, de réduire le risque d'incendies et d'extraire les matières, produites par les gaz de combustion. L'eau est également utilisée pour différentes opérations de nettoyage. Tout comme dans la production de produits isolants, en fibres de verre, l'eau de procédé et collectée, filtrée et réutilisée.

La laine de roche peut également être fabriquée dans des fours réverbère, à flammes plasma, et des fours à arc électrique immergé. Les autres opérations, du procédé de fabrication, y compris le fibrage, sont identiques. La conception et le fonctionnement des fours réverbères, utilisés pour la fabrication de laine de roche et de laine de laine de laitier, peuvent être comparés à ceux des fours réverbère, utilisés dans la fabrication de la laine de verre. Le four est composé d'une cuve en matériau réfractaire, chauffée par les brûleurs alimentés au combustible fossile, du type à brûleurs transversaux ou à boucle. La surface des zones de fusion peut atteindre 100 m<sup>2</sup>. Ici aussi, du fer métallique est produit, par réduction à partir des matières premières, et il est ensuite drainé, par exemple à travers une bague de palier, munie d'orifices, située dans le fond du four.

Les fours à arc électrique immergé, pour la production de laine de roche, sont constitués d'une enveloppe cylindrique en acier, pouvant être revêtue de matériau réfractaire et refroidie à l'huile ou à l'eau. Les électrodes sont immergées, dans la masse en fusion, à partir du haut du four, et fournissent l'énergie nécessaire à la fusion, par le biais d'une résistance chauffante. Les matières premières sont chargées par le haut du four, pour former une couverture de composition, sur la surface fondue. Toutefois, étant donné la disposition des électrodes, il y a toujours un bain de fusion, ouvert autour des électrodes. Parfois, la surface en fusion peut être simplement partiellement couverte, couverture chaude, à l'intérieur du four électrique. Les électrodes employées sont au graphite. Ce qui produit une petite quantité de fer métallique, par réduction à partir des matières premières. Le fer est drainé, mais moins fréquemment, une fois par semaine ou moins, que pour les cubilots.

## 2.10 Fibres céramiques

[tm8 S2 3.03]

Le procédé de production des fibres céramiques se divise en deux parties, la production des fibres et la transformation de celles-ci en d'autres composants. Les compositions chimiques habituellement utilisées pour les fibres céramiques figurent au Tableau 2.9.

Les oxydes d'aluminium, de calcium, de magnésium, de silicium et de zirconium sont livrés en vrac, dans des camions-citernes, et transférés par voie pneumatique, dans les silos de stockage. Des quantités moins importantes de matières premières, y compris des additifs organiques, sont livrées en fûts ou en sacs. Les matières premières en vrac sont ensuite transférées des zones de stockage aux équipements d'agitation, où elles sont mélangées, pour obtenir la composition nécessaire. Le mélange est ensuite transféré à l'intérieur du four, où il est fondu à l'aide d'une résistance électrique chauffante, à des températures pouvant atteindre 2 000°C. Les fours ont une profondeur d'environ 1 mètre et un diamètre de 2 à 3 mètres. La partie supérieure est ouverte et recouverte d'une couche de composition non encore fondue.



Le mélange en fusion coule à partir du four, sur des roues qui, en tournant très rapidement, éjectent un brouillard de fibres à l'intérieur d'une chambre collectrice, ou en face d'un jet d'air haute pression, qui refroidit le matériau en fusion, en formant des fibres. Dans aucun des cas l'adjonction d'agglomérant n'est nécessaire. On peut, en revanche, ajouter aux fibres, une petite quantité de lubrifiant, pour aider l'aiguilletage.

Lorsque la production de fibres est interrompue, le matériau en fusion continue à couler. Dans ce cas, il est trempé dans l'eau et, si possible, recyclé dans le procédé.

Les fibres sont ensuite transférées de la chambre collectrice à un convoyeur continu, qui peut être équipé d'un aspirateur. Les fibres, ainsi obtenues, sont ensuite sorties du convoyeur, mises en balles et emballées, ou alors elles poursuivent le procédé de production, jusqu'à la formation d'un matelas. Le matériau ainsi obtenu peut être mis en balles, comme produit fini, ou bien aiguilleté, de façon à fixer les fibres et à les renforcer. Le produit aiguilleté peut être passé dans un four, afin d'éliminer le lubrifiant, avant d'être roulé, sous forme de matelas, ou coupé en pièces de différents formats.

D'autres transformations en aval peuvent également être effectuées. Le procédé de formage sous vide consiste à remplir des moules, de formes différentes, avec un mélange colloïdal d'amidon, de latex, de silice ou d'argile. La forme, ainsi moulée, est ensuite séchée, dans un four à gaz, et peut être polie et ébarbée et coupée, à la taille souhaitée, avant d'être emballée et expédiée. On peut également avec cette technique produire du papier, du feutre et du carton. Cela implique l'application d'une suspension aqueuse de fibres, sur un tambour à vide, suivie du séchage au four. On peut également ajouter un mélange de liants et d'additifs, à la suspension aqueuse.

Composant	Silicate d'alumine très pur (%)	Silicate d'alumine au zirconium (%)
SiO <sub>2</sub>	48,5 à 54	47,5 à 50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45,5 à 50,5	35 à 36
K <sub>2</sub> O	< 0,01	<0,01
Na <sub>2</sub> O	0,2	<0,03
MgO	<0,01	0,01
CaO	<0,05	<0,05
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,04
ZrO <sub>2</sub>	0,2	15 à 17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,2	<0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,01	<0,01

**Tableau 2.9 : Composition chimique habituelle de fibres céramiques réfractaires en pourcentage du poids**

## 2.11 Frittes

[tm8 S2 3.03. tm46 ANFFECC]

La préparation des frittes consiste à faire fondre des matières premières, dans un fondoir à verre, à haute température. Le matériau en fusion est ensuite trempé, ce qui provoque une solidification rapide et la formation de particules friables, appelées "frittes". Les frittes de verre sont utilisées, en tant que matériau brut, pour la fabrication de glaçures pour céramique. Il s'agit d'un revêtement vitreux, qu'on applique sur un objet en céramique, et que l'on fait fondre ensuite en le chauffant. Les frittes d'émail sont utilisées, comme matière première, dans la production de l'émail, que l'on applique sur les métaux, pour les décorer ou les protéger. Les glaçures et l'émaillage peuvent être appliqués à sec ou par voie humide, cette dernière méthode étant la plus commune, surtout sous la forme de couche ou de suspension.

Dans le procédé de fabrication des frittes, on fait fondre des matières premières solubles dans l'eau, dans du verre insoluble. Ce qui permet de distribuer facilement et uniformément ces

matières dans la suspension de glaçure ou d'émail, pendant les opérations de traitement ultérieures. De plus, certaines matières premières utilisées, dans la fabrication de glaçures ou d'émaux, sont à la fois toxiques et solubles. La transformation de ces matières, en verre insoluble, réduit au minimum la dissolution des substances toxiques et, par conséquent, leur potentiel polluant.

Les matières premières, utilisées dans la fabrication de frites de verre et d'émail, sont essentiellement identiques. Elles peuvent être réparties en quatre catégories principales, les réfractaires, les fondants, les opacifiants et les colorants. Parmi les réfractaires figurent des produits tels que l'argile, le feldspath et le quartz. Ils sont généralement acides et donnent de la consistance aux frites. Les fondants sont basiques et réagissent, avec les réfractaires acides, pour former le verre. Ils comprennent des produits tels que le carbonate de sodium, le carbonate de potassium, le borax, la cryolite et la fluorine.

Les opacifiants confèrent cet aspect blanc laiteux, qui caractérise un grand nombre d'émaux. Il peut s'agir d'opacifiants insolubles, comme le dioxyde de titane, l'oxyde d'étain et l'oxyde de zirconium, ou bien d'opacifiants dévitrifiants, comme la cryolite ou la fluorine. Ces derniers peuvent également agir en tant que fondants, pour rendre l'émail davantage fusible. Les opacifiants peuvent ne pas être employés, pendant la phase de formation des frites, et peuvent être ajoutés, en revanche, pour le revêtement. Les colorants peuvent être des oxydes, des éléments ou des sels. Ils peuvent également agir en tant que réfractaires, ou fondants et comprennent des substances telles l'oxyde de cobalt, l'oxyde de chrome et l'oxyde de manganèse.

Les matières premières peuvent être stockées, dans des silos et transportées, sur la zone de chargement, par voie pneumatique ou mécanique. Toutefois, étant donné la taille relativement réduite de certaines installations de production, de nombreuses matières sont stockées en sacs et chargées manuellement, dans les appareils de dosage. Les différentes matières premières sont pesées, avec précision et mélangées, pour produire une composition homogène, d'un point de vue physique ou chimique, avant d'être chargées dans le four.

L'industrie des frites utilise des fours en continu et des fours en discontinu. Le choix des fours dépend du volume de la production et de la formule de composition des produits. Étant donné la nature spécifique de l'activité, de petites quantités de mélanges peuvent être produites, pour une large gamme de formules de frites. Les fours à frites sont généralement des fours au gaz naturel ou au fioul. Mais beaucoup d'installations modernes en Europe utilisent des fours oxycombustion.

Dans les fours en continu, les matières premières sont chargées, à travers un dispositif d'alimentation à vis, et sont présentées en tas, au point de chargement. Les brûleurs, disposés sur les côtés, créent des conditions de température suffisamment stables, pour permettre à la partie extérieure du tas de fondre sans interruption. Certains fours plus petits sont du modèle à boucle à un seul brûleur. En fondant, les matières premières forment une couche creuse, à la base du four, avant de couler, pour ressortir à l'autre bout du four. La production reste constante. Car le tas de matières premières, à l'entrée du four, est approvisionné sans interruption. Les frites fondues peuvent être directement trempées, dans un bain d'eau, ou bien refroidies, entre deux cylindres refroidis à l'eau, pour obtenir un produit en flocons.

Les fours en discontinu ont une forme de caisse, ou bien ce sont des récipients cylindriques, intérieurement revêtus de réfractaires, montés sur roulements à billes, pour permettre une certaine rotation. Afin d'éviter toute contamination, ces fours sont généralement réservés à des produits dotés de formules similaires. Bien qu'il soit toujours possible de nettoyer les fours, entre deux fusions. Les matières premières sont chargées, à travers une ouverture, placée en haut du four, ce qui peut provoquer un gros volume d'émission de particules en peu de temps. La trempe à l'eau directe est presque exclusivement utilisée dans la fabrication en discontinu, et l'eau de trempe peut être contaminée par des particules et par les composants solubles, présents dans le matériau fondu.

Les températures, à l'intérieur du four, sont généralement comprises entre 1000°C et 1500°C. Bien que des températures moins élevées puissent être utilisées, pour les frites fortement chargées en

plomb. La fusion peut générer des fumées de métaux et d'autres particules. Le séjour dans le four est généralement inférieur à 4 heures.

Pour produire une couche de revêtement, la fritte doit être d'abord parfaitement meulée. Le broyage est généralement effectué dans un broyeur à boulets, équipé de boulets d'alumine, ou de galets sphériques, placés dans l'eau. On peut ajouter à la glaçure ou à l'émail, d'autres composants, tels que de l'argile, des couleurs, des électrolytes et des opacifiants, pendant n'importe quelle phase du procédé de polissage. Ce cycle peut avoir une durée variable, entre 6 et 16 heures. Une fois le broyage terminé, le revêtement mélangé est passé au tamis à mailles et au-dessus d'un aimant, pour éliminer les débris métalliques. Pour les produits secs, la couche de revêtement peut être séchée, ou bien on peut utiliser un procédé de broyage à sec.



## 3 NIVEAUX REELS DE CONSOMMATION ET D'EMISSION

### 3.1 Introduction

Vous trouverez dans ce chapitre des informations concernant les taux de consommation et les niveaux d'émissions polluantes, constatés pour l'industrie du verre, dans l'Union Européenne, en tenant compte des procédés et des techniques décrites au Chapitre 2. La consommation et la production sont traitées d'abord pour tout le secteur dans son ensemble, puis, de manière plus spécifique, pour chacun des secteurs qui le composent.

Les caractéristiques essentielles, en termes de sources d'émission et de consommation d'énergie, sont identifiées dans ce chapitre et ensuite traitées séparément, pour chacune des techniques, au Chapitre 4. Les données contenues dans ce chapitre doivent permettre d'évaluer, dans le contexte, les valeurs relatives aux émissions et à la consommation d'énergie, des installations faisant l'objet d'une demande d'autorisation d'exploitation, en les comparant aux autres procédés utilisés, dans le même secteur ou dans l'industrie du verre, dans son ensemble.

La plupart des matières premières, utilisées pour la production du verre, sont des minéraux d'origine naturelle, ou bien des substances inorganiques, fabriquées de façon industrielle. La plupart des minéraux employés se trouvent en abondance dans la nature et, généralement, l'approvisionnement de ces matières premières, n'entraîne aucun problème particulier pour l'environnement. Toutefois, l'un des objectifs de la Directive PCIP est de minimiser la consommation de matières premières, par l'application des MTD. Les matières premières, d'origine industrielle, sont généralement fabriquées dans des entreprises soumises à des normes différentes. Les résidus de la fabrication et les déchets, générés par la consommation, deviennent des matières premières de plus en plus importantes pour l'industrie du verre, notamment dans les secteurs du verre d'emballage et de la laine minérale.

Le principal problème d'ordre environnemental, lié à l'industrie du verre, dans son ensemble, ce sont les émissions atmosphériques et la consommation d'énergie. La fabrication du verre est une activité à haute température et à forte consommation d'énergie, dans laquelle l'énergie peut être fournie directement, par la combustion de combustibles fossiles, ou bien indirectement par chauffage électrique, ou par une combinaison de ces deux techniques à la fois. Généralement, parmi les émissions les plus significatives figurent les oxydes d'azote, les particules, l'anhydride sulfureux, les halogénures et, dans certains cas, les métaux. Les émissions aqueuses ne constituent pas un problème de majeur, pour la plupart des installations, dans le secteur de la production du verre. Bien qu'il existe des exceptions à ce sujet. L'eau est essentiellement utilisée pour le nettoyage et le refroidissement et, généralement, elle est immédiatement traitée ou réutilisée. Le niveau des déchets de fabrication est relativement faible, une grande partie des déchets solides étant directement recyclés, dans le procédé de production.

L'industrie du verre est un secteur extrêmement diversifié et les données, mentionnées ci-dessus, ne peuvent qu'être très génériques. Certaines exceptions, liées à des traitements spécifiques ou à certaines installations en particulier, existent, et les priorités environnementales peuvent varier selon les secteurs. Lorsque ces exceptions sont spécifiquement inhérentes à un secteur précis, elles sont traitées dans le paragraphe correspondant à ce secteur. Toutefois, nous n'allons pas pouvoir traiter tous les cas spécifiques, aux différents types d'installations, et certaines émissions, liées à une installation précise, peuvent ne pas être prises en considération, dans le présent document. Par conséquent, les données fournies ici, sur les émissions provenant de la fabrication du verre, ne doivent en aucun cas être considérées comme exhaustives. Les informations présentées, dans le présent paragraphe, concernent des installations de production du verre de différentes tailles, employant des modes de fonctionnement distincts. Mais elles ne prennent pas en compte des cas spécifiques, tels que les créations d'activité et cessations. Certaines valeurs d'émission, parmi les plus faibles, se rapportent au fonctionnement d'une seule usine, qui arrive à obtenir ces résultats grâce à une situation tout à fait spécifique. Dans ce cas, les résultats ne sont pas forcément représentatifs des MTD, du secteur concerné.

Les émissions peuvent beaucoup varier d'un secteur à l'autre et d'une installation à l'autre. Les principales différences sont inhérentes aux matières premières et aux produits, de chaque secteur, au choix du procédé, en particulier le type de fondoir à verre, au volume de la production et au degré de réduction appliqué. Dans l'analyse des émissions, produites par les différents secteurs et installations, il convient de prendre en compte, outre les concentrations, les quantités générales de chaque substance émise et sa masse, par tonne de produit fondu.

Certaines données, relatives aux émissions, fournies dans le présent chapitre, sont par la force des choses, relativement générales et peuvent présenter des plages de valeurs assez larges. Tout en étant représentatives, ces plages de valeurs ne sont pas nécessairement suffisamment détaillées pour être comparées à celles d'une installation précise. C'est la raison pour laquelle, nous avons décidé de présenter dans l'Annexe 1, un certain nombre d'études de cas, qui sont largement représentatives des plages de valeurs fournies, ou qui constituent des exemples des résultats, dans un secteur donné.

### 3.2 Vue d'ensemble de l'Industrie du Verre

Ce paragraphe présente une analyse qualitative des différents problèmes, communs à la plupart des procédés utilisés, dans l'industrie du verre et des différents secteurs, appartenant à celle-ci. Les problèmes particuliers, inhérents à chaque secteur, sont traités dans les derniers paragraphes, qui présentent, autant que possible, des données relatives aux niveaux d'émission et de consommation. Des remarques plus détaillées, sur les mécanismes de formation des substances émises, et les facteurs qui influent sur les niveaux d'émission sont fournis, s'il y a lieu, au Chapitre 4.

#### 3.2.1 Apports utilisés dans le procédé

Les apports essentiels, utilisés dans le procédé, peuvent être répartis en quatre catégories principales, les matières premières qui composent en partie le produit, l'énergie, les combustibles et l'électricité, l'eau et les matériaux secondaires, additifs, produits de nettoyage, produits chimiques pour le traitement des eaux, etc. Les problèmes relatifs à la consommation d'énergie sont traités à part, au Paragraphe 3.2.3.

L'industrie du verre, telle quelle est décrite dans le document, comprend plusieurs procédés et une large gamme de produits, de matières premières et de traitements. Il est impossible de traiter, dans un document de ce type, tous les apports utilisés dans le procédé, même dans les paragraphes spécifiquement consacrés aux différents secteurs. Par conséquent, ce document met l'accent sur les types d'apports les plus communs et ceux qui ont des effets importants sur l'environnement.

Les matières premières utilisées, dans l'industrie du verre, sont en grande partie des composés solides inorganiques, à savoir des minéraux qu'on trouve à l'état naturel ou bien des substances d'origine industrielle. Elles peuvent inclure des matières grossièrement broyées ou des poudres extrêmement fines. Les liquides et les gaz sont aussi largement employés, mais en tant que produits auxiliaires et combustibles. Le Tableau 3.1, indique les matières premières les plus couramment utilisées, dans la fabrication du verre. Etant donné le grand nombre de matières premières différentes, ce tableau doit être considéré comme seulement indicatif et non exhaustif. Les matières premières, employées pour le formage du produit, et les autres opérations en aval, revêtements et agglomérants, sont davantage spécifiques à chaque secteur et seront traitées dans les derniers paragraphes. L'une des matières premières, qui deviennent de plus en plus importantes pour la fusion, ce sont les poussières recyclées, provenant des systèmes de réduction, employés dans la fabrication. La composition des poussières dépend de la nature du procédé et de l'emploi ou non d'agents absorbants



Matière première	Forme	Description	Source/Remarques
<b>Matières premières pour la formation du verre</b>			
sable siliceux	Granulaire	Source principale de SiO <sub>2</sub>	Extrait des carrières sous la forme de sable granulaire ou de grès, successivement broyé, calibré et traité pour éliminer les impuretés. Le sable siliceux doit être très pur.
Calcin	Granulaire	verre	Verre recyclé provenant du procédé de production. Composition du verre identique à celle du verre produit.
Calcin généré par la consommation	Granulaire	verre	Verre recyclé dans le cadre des programmes de collecte. La pureté des déchets et l'homogénéité de la couleur peuvent varier.
<b>Matériaux intermédiaires et modifiants</b>			
Syénite à néphéline Na <sub>2</sub> O.K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub>	Granulaire	Source principale de l'oxyde d'aluminium dans le verre transparent.	Extrait des carrières, broyé et calibré. Faible contenu en fer. Deux principales sources : la Norvège et la Chine, mais aussi le Canada..
Carbonate de sodium – Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,	Granulaire	Source principale de Na <sub>2</sub> O.	Fabriqué à partir de sel naturel par le procédé Solvay en Europe, contenant une certaine quantité de NaCl. Le carbonate de sodium d'origine naturelle est également importé des USA. Des sources africaines sont rarement utilisées en Europe.
Calcaire CaCO <sub>3</sub>	Granulaire	principale source de CaO	Extrait, broyé et calibré. Dans le secteur de production de la laine de roche le calcaire est utilisé en pièces de plus grandes dimensions >50 mm de diamètre
Dolomite CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub>	Granulaire	Source de CaO et MgO	Extraite, broyée et calibrée. Dans la production de la laine de roche la dolomite est utilisée en pièces de plus grandes dimensions >50 mm de diamètre
Carbonate de potassium	Granulaire	Source de K <sub>2</sub> O	Utilisé pour la fabrication de verres spéciaux, cristal au plomb 24%, verre pour téléviseurs etc., Produit synthétique.
Colémanite	Poudre	Source de bore.	Borate naturel extrait en Turquie et utilisé pour la fabrication de fils de verre continus
Borax	Granulaire	Source de bore.	Borate de sodium synthétique, provenant principalement de Californie.
Acide borique H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Granulaire	Source de bore	Produite synthétique principalement utilisé pour la fabrication de fils de verre continus
Feldspath	Granulaire	Source de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Principale source de l'alumine utilisée dans le verre sodocalcique coloré. Produit naturel.
Fluorite CaF <sub>2</sub>	Granulaire	Source de fluorine.	Produit naturel utilisé principalement pour la fabrication d'opale.
Oxyde de plomb	Poudre	Source de PbO.	Le PbO est contenu dans le cristal au plomb et dans les verres spéciaux.
Carbonate de Baryum	Granulaire	Source de l'oxyde de baryum BaO	Produit industriel principalement utilisé pour la production de verres spéciaux.
Basalte	Granulaire	Silicate d'alumine	Dans la production de la laine de roche il est utilisé en pièces de plus grandes dimensions >50 mm de diamètre
Sulfate de sodium anhydre	Granulaire	Agent affinant et oxydant. source de Na <sub>2</sub> O	Produit industriel.
Sulfate de calcium et gypse	Granulaire	Agent affinant et oxydant. source secondaire de CaO	Naturel ou industriel
Kaolin	Poudre	Source d'alumine.	Produit naturel principalement utilisé dans la

Matière première	Forme	Description	Source/Remarques
			production de fils de verre continus
Nitrate de sodium	Granulaire	Agent affinant et oxydant. source de $\text{Na}_2\text{O}$	Produit industriel
Nitrate de potassium	Granulaire	Agent affinant et oxydant. source de K.	Produit industriel
Oxyde d'antimoine	Poudre	Agent affinant et oxydant	Produit industriel, principalement utilisé dans la composition de verres spéciaux.
Trioxyde d'arsenic	Poudre	Agent affinant et oxydant	Produit industriel. . principalement utilisé dans la composition de verres spéciaux et du cristal au plomb 24%
Scories Mélange de silicate et sulfite de Ca. Al. Mg. Fe	Granulaire	Source d'oxyde d'aluminium oxydes modificateurs. agents affnants. fondants et colorants	Dérivé du produit de la combustion. La taille des particules doit être adaptée aux matières premières du verre.
Carbone	Granulaire ou poudre	Agent de réduction	Produit industriel ou naturel transformé, de petites quantités utilisées pour la production d'un verre à faible oxydation de couleur vert ambrée ou parfois transparent.
Chlorure de sodium	Cristaux	Agent affinant	Utilisé dans certains verres au borosilicate.
Agents colorants			
Chromate de fe, $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3$	Poudre	Agent colorant	Extrait des carrières, broyé et calibré. Le chromate de fer est le colorant utilisé pour la fabrication du verre de couleur verte pour emballages.
Oxyde de fer $\text{Fe}_2\text{O}_3$	Poudre	Agent colorant	Produit industriel principalement utilisé comme colorant pour le verre vert et jaune.
Oxyde de cobalt	Poudre	Agent colorant	Produit industriel utilisé à la fois comme décolorant et colorant pour la fabrication de verre de couleur bleue.
Sélénium métal/zinc ou sélénite de sodium	Poudre	Agent colorant	Produit industriel, de toutes petites quantités employées en tant que "décolorant", correcteur de couleur. D'importantes quantités utilisées dans la fabrication du verre bronze.

**Tableau 3.1 : Principales matières premières employées dans la fabrication du verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]**

L'industrie du verre, dans son ensemble, n'est pas une grosse consommatrice d'eau. Les principales utilisations de celle-ci étant le refroidissement, le nettoyage et l'humidification de la composition. Dans certains secteurs spécifiques, l'eau est également employée pour d'autres fonctions, qui seront traitées plus loin, dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs. Lorsque cela est possible, les circuits hydrauliques sont en boucle, et provoquent des émissions par évaporation. L'eau peut être fournie par le réseau public d'adduction d'eau ou puisée à des sources naturelles.

Le terme "matières auxiliaires" est utilisé pour désigner les substances employées, dans la fabrication du verre qui ne font, toutefois, pas partie du produit fini. Par exemple, l'étain et l'hydrogène ; employés dans les bains de float, l'oxygène, présent dans les fours oxycombustion, le dioxyde de soufre, utilisé dans la fabrication du verre plat, et parfois, du verre d'emballage, le traitement superficiel, les agents frelatants et les acides décapants, utilisés dans la production du cristal au plomb 24%. Ces matières sont, en général, relativement spécifiques à chaque secteur

et seront traitées dans les paragraphes consacrés à ce sujet. L'incidence de ces substances sur les émissions, générées par le procédé de production, varie selon les cas. Dans certains cas, elle peut être relativement importante, par exemple lorsqu'il s'agit dépolissage à l'acide, tandis que dans d'autres, elle est très faible, par exemple les émissions d'étain, produites par les bains de float.

La fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie et, pour cette raison, les combustibles constituent un poste important. Les principales sources d'énergie, utilisées dans l'industrie du verre, sont le fioul, le gaz naturel et l'électricité. Les questions relatives à l'énergie et aux combustibles sont traitées au Paragraphe 3.2.3, ainsi que dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs.

### 3.2.2 Produits du procédé de fabrication

Les principaux produits, générés par le procédé de fabrication, peuvent être répartis en cinq catégories principales, le produit fini, les émissions atmosphériques, les émissions liquides, les déchets de fabrication solides et d'énergie. Les déchets liquides ou solides peuvent être recyclés ou éliminés, selon les exigences spécifiques à chaque procédé. Généralement, les usines de fabrication du verre ne génèrent pas de quantités significatives de sous-produits ou de produits dérivés. Toutefois, la transformation en produit commercialisable, ou gratuit, de matières qui, autrement seraient destinées à être éliminées, en tant que déchets, devient de plus en plus courante, ces déchets servant principalement de charge d'alimentation, pour d'autres procédés industriels, ou étant vendus comme produits finis.

Généralement, la fabrication du verre comporte la fusion d'une importante quantité d'oxydes de métaux, de carbonates, de sulfates et de nitrates. Lors de la fusion, ces substances se décomposent, en émettant des gaz tels que le dioxyde de carbone, des vapeurs d'eau et des oxydes de soufre et d'azote. La composition peut également contenir de l'humidité, entre 0 et 4 %, incorporée par voie physique ou chimique, qui se dégage des matières premières, au fur et à mesure que celles-ci sont chauffées, sous la forme de vapeur d'eau. Généralement, entre 3 % et 20 % du poids de la composition peut être émis sous la forme de gaz. Lorsque de grosses quantités de calcin sont utilisées, dans le procédé, la valeur relative aux émissions de gaz est extrêmement faible, 1 tonne de calcin remplace environ 1,2 tonnes de matières premières, non recyclées.

Parmi les autres produits du procédé figurent le bruit et les odeurs. Le bruit est généré par toute une série d'opérations, la ventilation, les moteurs, la manutention des matériaux, la circulation des véhicules, les activités de construction et les systèmes à air comprimé. La pollution acoustique n'est pas considérée comme un problème majeur, dans le secteur de la production du verre. Toutefois, il existe des sources sonores, qui pourraient provoquer des problèmes, en cas de construction d'une zone résidentielle à proximité. Généralement, les problèmes de pollution acoustique sont rapidement résolus, en concevant correctement les installations et, si nécessaire, par l'application de techniques de réduction des nuisances sonores adaptées. Certaines techniques de maîtrise de la pollution peuvent également nécessiter un contrôle sonore, qui peut venir s'ajouter aux frais généraux de la mise en place de la mesure concernée. Les odeurs ne constituent pas non plus un problème majeur, dans l'industrie du verre. Bien qu'elles puissent être générées par certains types d'activités, et que des mesures puissent être requises, pour éviter des problèmes, dans les zones environnantes. Les principales activités génératrices d'odeurs sont le traitement thermique de la laine minérale, le préchauffage du calcin et, parfois, le stockage du fioul.

#### 3.2.2.1 Emissions atmosphériques

##### Matières premières

Tous les secteurs de production du verre utilisent des matières premières, sous forme de poudre, de granulés ou de poussières. Le stockage et la manutention de ce type de matières représente une importante source potentielle d'émission de poussières. Le déplacement des matières, à l'intérieur de systèmes, des silos et des récipients d'agitation, provoque un déplacement d'air, qui, s'il n'est pas correctement maîtrisé, peut donner d'importantes concentrations de poussières. Ceci se produit notamment, lorsqu'on utilise des systèmes de transfert pneumatiques. Le transport des matières premières, sur des convoyeurs, et la manutention manuelle, peuvent également générer d'importantes émissions de poussières.

De nombreux procédés, appliqués dans l'industrie du verre, emploient du calcin, interne ou externe, qui doit souvent être trié et broyé, avant d'être chargé dans le four. Cette opération, tout comme d'autres similaires, peut provoquer des émissions de poussières. Le niveau d'émission dépend de facteurs tels que la structure de l'installation de production, le filtrage ou non des matières aspirées avant leur évacuation, la bonne tenue des bâtiments, etc. Certains procédés emploient également des liquides volatiles, pouvant provoquer des émissions atmosphériques, en raison de fuites des réservoirs et du déplacement de vapeurs, pendant le transfert des liquides.

### Fusion

Pour la plupart des procédés, pris en considération dans le présent document, le principal risque pour l'environnement est lié aux opérations de fusion. Généralement, les principaux produits polluants de la fusion sont :

- Les produits de la combustion de combustibles fossiles et l'oxydation à haute température de l'azote, dans l'atmosphère de combustion, l'anhydride sulfureux, le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote.
- les particules, principalement générées par la volatilisation, et la condensation successive des matières premières volatiles, contenues dans la composition et
- Les gaz émis par les matières premières et le verre en fusion, pendant le procédé de fusion.

Une alimentation électrique à 100 % élimine directement les émissions dues aux produits de la combustion et à l'azote, généré par la chaleur, tandis que les émissions de particules proviennent principalement du déplacement de la composition. Le remplacement partiel du combustible fossile par l'électricité réduit les émissions, directement produites par l'installation, en fonction du niveau de remplacement et des conditions de combustion, spécifiques à l'installation. Le chauffage oxycombustion réduit de manière significative la quantité d'azote à l'intérieur du four, en diminuant ainsi le risque de formation de Nox. Dans l'analyse de l'impact global de la fabrication sur l'environnement, il faudra prendre en considération les émissions liées à la génération de l'électricité et de l'oxygène.

Les fours, utilisés pour la production du verre en général, et dans chaque secteur en particulier, sont de dimensions, de capacité de production, de techniques de fusion, de structure, d'ancienneté, de matières premières utilisées et de techniques de réduction appliquées, très différentes. Les émissions varient, donc, en conséquence. On constate également, des différences importantes, dans les méthodes de mesure des émissions, ce qui peut rendre peu fiable la comparaison directe entre les données. Les valeurs minimum ne sont pas toujours nécessairement indicatives, des meilleures technologies, et peuvent refléter des conditions de fonctionnement particulièrement favorables, par exemple un gros volume de production stable ou des compositions à faibles émissions, ou se rapporter à des installations à plus faible volume de production. Bien entendu, les plus faibles niveaux d'émission sont liés à des installations modernes, appliquant des mesures de réduction avancées, ou des technologies "propres". Les principales émissions, générées par les opérations de fusion, dans l'industrie du verre, sont résumées par le Tableau 3.2 ci-dessous.

Emissions	Source / Remarques
Particules	Condensation de composants volatiles du mélange.

Emissions	Source / Remarques
	Transport de poussières dans la composition. Produit de la combustion de certains combustibles fossiles.
Oxydes d'azote	Nox thermique dû aux températures de fusion élevées. Décomposition des composés de l'azote contenus dans la composition. Oxydation de l'azote contenu dans les combustibles.
Oxydes de soufre	Soufre contenu dans le combustible. Décomposition des composés du soufre contenus dans la composition. Oxydation du sulfure d'hydrogène dans les cubilots à vent chaud.
Chlorures/HCl	Présents en tant qu'impuretés dans certaines matières premières, en particulier le carbonate de sodium synthétique et le calcin provenant de sources extérieures. Le NaCl est utilisé en tant que matière première pour certains verres spéciaux.
Fluorures/HF	Présent en tant qu'impureté secondaire dans certaines matières premières. y compris le calcin provenant de sources extérieures. Ajoutés en tant que matières premières dans la production de frites émaillée pour conférer certaines propriétés au produit fini. Ajoutés en tant que matières premières dans la production de fibres de verre à fil continu et dans certaines compositions de verre pour améliorer la fusion. ou pour conférer au verre certaines propriétés. par exemple l'opalescence. Les compositions contenant des fluorures. tels que la fluorine. peuvent donner lieu à d'important volumes d'émission incontrôlées.
Métaux lourds ,entre autres : V. Ni. Cr. Se. Pb. Co. Sb. As. Cd,	Présents en tant qu'impuretés secondaires dans certaines matières premières. dans les calcin provenant de la consommation et dans les combustibles. Utilisés dans les fondants et les colorants employés dans la fabrication des frites ,surtout le plomb et le cadmium., Employés dans certaines formules spéciales ,entre autres, le cristal au plomb 24% et certains verres colorés. Le sélénium est employé en tant que colorant ,verre de bronze, ou en tant qu'agent décolorant pour certains verres transparents.
Dioxyde de carbone	Généré par la combustion. Emis suite à la décomposition des carbonates présents dans la composition par exemple le carbonate de sodium, le calcaire.
Monoxyde de carbone	Produit par une combustion incomplète, spécialement dans les cubilots à vent chaud.
Sulfure d'hydrogène	Formé à partir du soufre contenu dans les matières premières ou dans le combustible dans les cubilots à vent chaud en raison des conditions de réduction présentes dans certaines parties du four.

Tableau 3.2 : Récapitulatif des émissions atmosphériques des opérations de fusion

Les concentrations des émissions, de métaux lourds et d'oligo-éléments, peuvent être significatives, dans certains procédés et sont généralement présentes dans les poussières. Le Tableau 3.3 ci-dessous, tiré de [tm41 VDI2578], montre quelques exemples réels. Les chiffres, indiqués ci-dessous, peuvent être considérés comme des chiffres indicatifs maximum, et ne sont pas représentatifs de l'application des MTD.

Métal	verre d'emballage	Verre plat	cristal au plomb 24%
Vanadium , avec four au fioul	jusqu'à 4 mg/Nm <sup>3</sup>	jusqu'à 2 mg/Nm <sup>3</sup>	
Nickel , avec four au fioul	jusqu'à 0,5 mg/Nm <sup>3</sup>	jusqu'à 0,4 mg/Nm <sup>3</sup>	
Chrome , verre vert	jusqu'à 3 mg/Nm <sup>3</sup>		
Sélénium	jusqu'à 1 mg/Nm <sup>3</sup>		
Sélénium. gazeux , flint creux	jusqu'à 14		

	mg/Nm <sup>3</sup>		
Plomb	jusqu'à 4 mg/Nm <sup>3</sup>	jusqu'à 1 mg/Nm <sup>3</sup>	jusqu'à 700 mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmium	jusqu'à 0,3 mg/Nm <sup>3</sup>	jusqu'à 0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	
Antimoine			jusqu'à 10 mg/Nm <sup>3</sup>
Arsenic			jusqu'à 20 mg/Nm <sup>3</sup>

**Tableau 3.3 : Emissions de métaux lourds potentiellement générées par la production du verre [tm41 VDI2578]**

### Activités en aval

Ce terme désigne toutes les opérations effectuées après la fusion, entre autres, le formage, le recuit, le revêtement, la transformation etc. Les émissions, provenant des activités en aval, peuvent beaucoup varier, d'un secteur à l'autre, et seront traitées dans les paragraphes relatifs aux différents secteurs. Bien que la plupart des secteurs appliquent les mêmes techniques de fusion, les opérations en aval sont généralement spécifiques à chaque secteur. Les émissions atmosphériques sont le plus souvent générées par :

- L'application des revêtements et/ou la teinture, par exemple laine minérale, fibres de verre à fil continu, verre d'emballage et, parfois le verre plat.
- des opérations telles que la découpe, le polissage ou les traitements secondaires, laine minérale, gobeletterie, verres spéciaux, fibres céramiques, et
- par certaines opérations de formage, laine minérale et fibres céramiques.

#### 3.2.2.2 Emissions aqueuses

Généralement, les émissions aqueuses sont relativement faibles, et peu de problèmes sont véritablement spécifiques à la production du verre. La plupart du temps, l'eau est utilisée pour le nettoyage et le refroidissement, et peut être rapidement recyclée ou traitée, par l'application de techniques standard.

La plupart des opérations utilisent des liquides, entre autres des produits chimiques, pour le traitement des eaux, des lubrifiants ou du fioul. Toutes les matières premières liquides constituent une menace potentielle pour l'environnement, en raison du risque de déversement ou des fuites. Dans de nombreux cas, l'application de "bonnes pratiques " de base, ainsi qu'une conception spécifiquement étudiée, suffisent à écarter ces risques d'émission. Les questions spécifiques, relatives aux émissions aqueuses, sont traitées dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs.

#### 3.2.2.3 Autres types d'émission

L'une des caractéristiques de la majorité des secteurs, de l'industrie du verre, est le recyclage, dans le procédé de fusion, de la plupart des calcins, générés par le procédé de production. Les principales exceptions, à cette règle, sont les fibres de verre à fil continu, les fibres céramiques et la fabrication de produits de très grande qualité, pour des verres spéciaux et de la gobeletterie. La laine minérale et les frites présentent des différences importantes de quantité de calcin recyclé, celle-ci pouvant aller de zéro à presque 100 %, pour certaines usines de production de laine de roche. Parmi les autres déchets, figurent ceux de la préparation des matières premières



et de la manutention, des dépôts de scories, généralement des sulfates, présents dans les gaz d'échappement et les déchets des réfractaires, au terme du cycle de vie du four.

Dans certains secteurs, les réfractaires contenant du chrome sont utilisés pour la construction de parois, de voûtes et de régénérateurs. Le chrome, combiné avec la magnésie, forme des briques de magnésie-chrome, très résistantes au transport des matières premières et aux produits de la combustion, ainsi qu'aux températures élevées, qu'on atteint à l'intérieur des chambres de régénération. Le chrome, utilisé pour la préparation de ces matériaux, le  $\text{Cr}^{3+}$ , est essentiellement non dangereux, faiblement soluble et comporte des risques minimes. Toutefois, en présence de hautes températures, dans des conditions alcalines et d'oxydation, de petites quantités de chrome se transforment en  $\text{Cr}^{6+}$ , pendant la fusion. Or, les composés du  $\text{Cr}^{6+}$  sont très solubles, toxiques et cancérigènes.

Tout comme pour les autres déchets de la fusion, tous les efforts sont mis en oeuvre pour recycler les déchets, à la fin de chaque campagne de fusion. Lorsque cela n'est pas possible, le  $\text{Cr}^{6+}$ , contenu dans les briques réfractaires en magnésie-chrome, sera évalué pour faire en sorte qu'il soit correctement classé et éliminé. Les réfractaires, contenant du chrome, utilisés dans le secteur du verre, diminuent progressivement, grâce au développement et à la modification de la conception des fours.

On peut également utiliser de petits volumes de réfractaires, à l'oxyde de chrome très pur. Ce type de matériau est généralement acheté pour être repris, à la fin de la campagne, par le fabricant qui va le recycler. Dans certains fours, de production de fibres de verre à fil continu, on utilise de grosses quantités de ce matériau réfractaire.

### 3.2.3 Energie

[tm14 ETSU. tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

La fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie, dans laquelle le choix de la source énergétique, de la technique de chauffage et de la méthode de récupération de la chaleur, sont essentielles pour la conception du four. Ces mêmes choix constituent également les facteurs les plus importants des performances environnementales et de rendement énergétique, des opérations de fusion. Par conséquent, l'un des apports essentiels, dans le procédé de production du verre, est justement l'énergie. Les trois principales sources énergétiques sont le fioul, le gaz naturel et l'électricité. L'exception est constituée par la fabrication de laine de roche, où la technique de fusion, la plus largement utilisée, est le cubilot alimenté au charbon.

Au cours des dernières décennies, le combustible le plus largement employé, dans la fabrication du verre, a été le fioul, bien que l'utilisation du gaz naturel se répande progressivement. Il existe différentes qualités de fioul, du très lourd au plus léger qui ont différents niveaux de pureté et de taux de soufre. De nombreux fours, de grandes dimensions, sont spécialement équipés pour fonctionner à la fois au gaz naturel et au fioul, et il arrive souvent que des fours, essentiellement alimentés au gaz, brûlent du fioul, dans un ou deux brûleurs. La troisième source d'énergie la plus courante est l'électricité, qui peut être employée comme source d'énergie unique ou avec des combustibles fossiles. Le chauffage, par résistance électrique, est la seule technique à avoir trouvé une large application commerciale, dans l'industrie du verre. Le chauffage électrique indirect a été utilisé, jusqu'ici, uniquement pour de très petits réservoirs et fours à pots, ou bien pour réchauffer certaines parties d'un réservoir, par exemple l'avant- bassin ou avant-creuset.

Généralement, l'énergie nécessaire, pour la fusion du verre, représente plus de 75 % de la consommation totale d'énergie de l'industrie du verre. Parmi les autres opérations, qui consomment d'importantes quantités d'énergie, figurent les avant-creusets, le formage, le recuit, le chauffage de l'usine et les services généraux. La consommation moyenne d'énergie, du secteur du verre d'emballage, qui représente environ 60 % de la production de verre de l'UE, se décompose comme suit : four 79 %, avant-creuset 6 %, air comprimé 4 %, galerie de recuit 2 %, galerie de chauffage 1 %, services généraux 1 %.

autres usages 6 %. Dans le présent document les chiffres, relatifs à l'énergie, se rapportent à au point d'utilisation et ne sont pas corrigés, pour tenir compte de l'énergie primaire.

Bien qu'il existe d'importantes différences, entre les secteurs et les usines de production, le verre d'emballage peut être considéré comme très représentatif de l'industrie dans son ensemble. La principale exception est le secteur de la laine minérale, où les opérations de fibrage et de traitement thermique, consomment également d'importantes quantités d'énergie.

Comme nous l'avons déjà dit plus haut, le fioul et le gaz naturel sont les principales sources d'énergie, pour la fusion, avec un plus petit pourcentage d'électricité. Les avant-creusets et les galeries de recuit sont alimentés au gaz ou à l'électricité, et l'énergie électrique est utilisée pour alimenter les compresseurs à air et les ventilateurs, utilisés dans le procédé. Les services généraux sont le pompage, la génération de vapeur, pour le stockage des combustibles, et le chauffage des oligo-éléments, l'humidification et le chauffage de la composition et le chauffage des locaux. Certains fours ont été équipés de chaudières récupératrices, pour produire la vapeur nécessaire ou du moins une partie de celle-ci.

Afin d'établir un critère de comparaison, pour le rendement énergétique de la fabrication, il convient d'examiner les valeurs théoriques, nécessaires pour la fusion du verre. Les valeurs théoriques, en matière d'énergie, pour les trois types de verre les plus courants, figurent au Tableau 3.4. Le calcul part de l'hypothèse que toute la chaleur disponible est utilisée et prend en compte trois éléments :

- la chaleur de réaction, nécessaire pour former le verre, à partir des matières premières.
- la chaleur requise, l'enthalpie, pour faire monter la température du verre de 20 °C à 1500 °C.
- la chaleur contenue dans les gaz, principalement le CO<sub>2</sub>, qui se dégagent de la composition pendant la fusion.

	<b>Verre sodocalcique (verre plat/verre d'emballage) GJ/tonne</b>	<b>verre aux borosilicates (8 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) GJ/tonne</b>	<b>cristal au plomb 19 % PbO GJ/tonne</b>
Chaleur de réaction	0,49	0,41	0,40
Enthalpie du verre	1,89	1,70	1,69
Enthalpie des gaz émis	0,30	0,14	0,16
Energie théoriquement nécessaire	2,68	2,25	2,25

**Tableau 3.4 : Energie théoriquement nécessaire pour la fusion des types de verre les plus courants [tm14 ETSU]**

La consommation d'énergie, requise par les différents secteurs, varie beaucoup, entre 3,5 environ à plus de 40 GJ/tonne. Cela dépend largement de la structure du four, du volume de la production et du fonctionnement des installations. Toutefois, le verre est généralement produit dans des fours de grandes dimensions, et l'énergie requise, pour la fusion est généralement inférieure à 8 GJ/tonne. La consommation d'énergie, pour chacun des secteurs, sera traitée plus loin, si l'on dispose de ces informations.

La fabrication du verre étant un procédé à forte consommation d'énergie et à haute température, le risque de déperdition de chaleur est important. Des progrès significatifs, en matière de diminution de la consommation d'énergie, ont été réalisés, ces dernières années, par exemple dans les grands fours régénératifs, pour approcher des valeurs minimums théoriques de consommation, pour les opérations de fusion, en tenant compte des limites inhérentes aux différents procédés.

Un four régénératif, de construction récente, aura un rendement thermique global de 50 %, maximum 60 %, avec une perte de gaz d'échappement de 20 %, les pertes structurelles représentant en grande partie le reste. Ce niveau de rendement thermique peut être tout à fait comparé à celui d'autres activités comportant une combustion à grande échelle, et notamment la génération d'énergie électrique, dont le rendement moyen se situe autour de 30 %. Les pertes structurelles sont inversement proportionnelles à la taille du four, la principale raison étant la modification du rapport entre la surface et le volume. Les fours électriques et oxycombustion ont de meilleurs rendements thermiques que les fours à combustible fossile, mais présentent d'autres inconvénients, dont nous allons traiter plus loin dans ce document.

Nous allons mentionner ci-dessous certains des facteurs les plus courants qui affectent la consommation d'énergie, des fours à combustible fossile. Pour chaque installation, il faut tenir compte des problèmes spécifiques qui influent sur l'applicabilité des remarques générales figurant ci-dessous. Ces mêmes facteurs influent également sur les émissions par tonne de verre, des substances qui sont directement liées à la quantité de combustible fossile brûlé, notamment le CO<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> et le NO<sub>x</sub>.

- a) La capacité du four influe de manière significative sur la consommation d'énergie, par tonne de verre fondu. Car les fours de grandes dimensions ont, par leur structure même, un meilleur rendement thermique, en raison d'un plus faible rapport surface/volume.
- b) Le débit du four est également important, la plupart des fours atteignant un rendement énergétique maximum à leur charge maximale. Les variations, dans la charge du four, dépendent en grande partie du marché et peuvent être assez significatives, en particulier en ce qui concerne certains types de verre d'emballage et de gobeletterie.
- c) Le rendement thermique du four est inversement proportionnel à son âge. Vers la fin du cycle de vie du four, la consommation d'énergie, par tonne de verre fondu, peut être jusqu'à 20 % supérieure, à la consommation constatée au début de la campagne.
- d) L'emploi du boosting électrique augmente le rendement thermique du four. Toutefois, lorsqu'on prend en compte le coût de l'électricité et le rendement de la génération et de la distribution de l'électricité, l'amélioration globale est moins significative, ou instantane. Le boosting électrique est généralement utilisé pour améliorer la capacité de fusion du four, plutôt que pour améliorer le rendement thermique du four.
- e) L'emploi de calcin peut réduire de manière significative la consommation d'énergie, l'énergie chimique nécessaire pour faire fondre les matières premières ayant déjà été fournie. En règle générale, une augmentation de 10 %, de la quantité de calcin utilisée, donne des économies d'énergie de 2 à 3 %, dans le procédé de fusion.
- f) L'alimentation oxycombustion peut également réduire la consommation d'énergie, notamment en ce qui concerne les plus petits fours. L'élimination d'une grande partie de l'azote de l'atmosphère de combustion réduit de 60 à 80 %, le volume des gaz d'échappement qui sortent du four. Par conséquent, on peut réaliser des économies d'énergie, car il n'est pas nécessaire de chauffer l'azote à la température des flammes.

La consommation d'énergie est une question extrêmement complexe, qui sera traitée de manière plus détaillée, dans les paragraphes consacrés aux différents secteurs, dans ce chapitre et au Chapitre 4. Depuis les années 60, l'industrie du verre a globalement réduit sa consommation d'énergie d'environ 1,5 % par an. Aujourd'hui ce chiffre est encore plus bas, car on approche des limites thermodynamiques.

Le Tableau 3.5, qui a été extrait de la directive de la VDI allemande [tm41 VDI2578], offre un résumé précieux de la consommation d'énergie, pour une série de fours de construction récente, dotés d'un rendement thermique élevé.

Type de four	Type de verre	Zone de fusion *	Profondeur du bain de verre Zone de fusion	Capacité du réservoir Zone de fusion	Rapp. longueur/ largeur du bain	Production T métriques/j	Production spécifique T métriques/d	Energie spécifique consommation **, kj/kg de verre
		m <sup>2</sup>	mm	T métriques				
Fours à brûleurs transversaux avec préchauffage de l'air de régénération	verre d'emballage	15 à 155	1 200 à 1700	50 à 500	1,9 à 3,0 / 1	40 à 500	2,5 – 4,0	4200
Fours à boucle régénératifs	verre d'emballage	15 à 140	1200 à 1700	50 –à 500	1,9 à 2,5 / 1	40 à 450	2,5 – 4,0	3800
Fours à récupération	verre d'emballage	jusqu'à 250	1100 à 1600	50 à 650	2,0 à 2,8 / 1	40 à 450	2,0 – 3,0	5000
Fours oxycombustion ***	verre d'emballage	110 à 154	1300 à 1700	390 à 600	2,0 à 2,4 / 1	350 à 425	2,3 – 3,5	3050 – 3500
Fours à brûleurs transversaux avec préchauffage de l'air de régénération	Verre plat	100 à 400	1200 à 1400	300 à 2500	2,1 à 2,8 / 1	150 à 900	2,3 – 2,7	6300
Fours à brûleurs transversaux avec préchauffage de l'air de régénération	verre pour téléviseurs, écrans,	70 à 300	900 à 1100	160 à 700	2,0 à 3,0 / 1	100 à 500	1,1 – 1,8	8300
Four avec préchauffage de l'air de récupération	vaisselle	15 à 60	1100 à 1300	40 à 180	1,8 à 2,2 / 1	15 à 120	1,0 – 2,0	6700
Four avec préchauffage de l'air de récupération	fibres de verre	15 à 110	800 à 1500	50 à 200	2,8 / 1	30 à 350	3,4	4300

\* La surface du four consacrée à la fusion du verre et l'affinage, généralement la zone entre le laboratoire et la gorge, dans le cas du verre float des fours avec une zone de conditionnement non chauffée

\*\* Consommation d'énergie spécifique sans avant-bassin et alimentateur, pendant le démarrage et fonctionnement à charge nominale, le réservoir vieillissant de 0,1 à 0,2 % par mois, sans boosting électrique, préchauffage de la fusion et récupération de la chaleur perdue, standardisé à  
70 % de calcin pour le verre d'emballage  
20 % de calcin pour le verre de float  
40 % de calcin pour le verre pour téléviseurs et la vaisselle

Economies d'énergie pour pourcentage de calcin complémentaire utilisé : 0,15 à 0,3 %

Les chiffres relatifs à la consommation spécifique d'énergie sont des valeurs d'orientation approximatives, pour de nouvelles usines de grandes et moyennes dimensions. Elles ne peuvent pas s'appliquer pour des analyses de compensation d'énergie, étant donné les différences significatives qu'on rencontre selon les cas. La consommation d'énergie réelle dépend non seulement du contenu en calcin et de l'ancienneté de la cuve, mais aussi, entre autres, de la composition, du préchauffage de l'air, de la charge du réservoir, de l'isolation du réservoir et de la qualité standard du verre, requise.

\*\*\*, Les données indiquées se fondent sur l'expérience de fonctionnement de deux usines qui utilisent la technologie oxycombustion. L'énergie nécessaire pour la production d'oxygène n'est pas comprise dans la consommation spécifique d'énergie.

**Tableau 3.5 : Exemples de consommation d'énergie, pour une série d'installations de production de verre**  
**[tm41 VDI2578]**

### 3.3 Verre d'emballage

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Comme déjà mentionné au Chapitre 1, le secteur de production du verre d'emballage est le plus important de l'industrie de verre européenne, et représente environ 60 % de la production totale. En 1997, 295 fours fonctionnaient en Europe, dans 140 installations. Parmi les types de fours utilisés figurent les fours régénératifs à brûleurs transversaux, les fours régénératifs à boucle, les fours à récupération, les fours électriques, et les fours oxycombustion. Les volumes varient aussi de manière significative, de moins de 50 000 tonnes par an, 10 000 pour les flacons pour parfums, à plus de 150 000 tonnes /an. La production d'une installation, équipée de plusieurs fours, peut être supérieure à 1 000 tonnes par jour.

Naturellement, un secteur aussi vaste et aussi varié comporte des différences significatives dans la quantité et le type d'apports utilisés, dans le procédé de fabrication et dans la production. Malgré cela, les produits de ce secteur sont presque exclusivement fabriqués à partir de verre sodocalcique ou de verre sodocalcique modifié, les différents types de matières premières étant dans ce cas limités.

Le rapport, entre l'apport de matières premières et le verre fondu obtenu, varie en fonction de la quantité de calcin utilisée, qui influe sur la quantité de gaz d'échappement, émis par les matières premières en fusion. Le dégazage et le séchage des matières premières représentent entre 3 % et 20 % de l'apport, 1 tonne de calcin remplace environ 1,2 tonnes, de matières premières vierges. Le rapport composition/verre fondu peut aller de 50 % à plus de 90 %, la plupart des calcins étant recyclés dans le four.

Le Tableau 3.6 ci-dessous montre les principaux apports et les principaux produits, issus du procédé de fabrication. Les émissions concernent des fours moyens.

	Unité/tonne (verre fondu)	Plage de valeurs			
Apports					
Calcin provenant de la consommation	tonne	0	à	0,85	0,40
Sable siliceux	tonne	0,04	à	0,66	0,35
Carbonates	tonne	0,02	à	0,40	0,20
Ingrédients minéraux secondaires	tonne	0,002	à	0,05	0,02
Réfractaires	tonne	0,005	à	0,01	0,008
Emballages	tonne	0,040	à	0,080	0,045
Moules et autres	tonne	0,004	à	0,007	0,005
Énergie. combustible. gaz. total 1	GJ	4	à	14	6,5
Énergie. électricité. total 1	GJ	0,6	à	1,5	0,8
Eau	m <sup>3</sup>	0,3	à	10	1,8
Produits					
Produits finis et emballés	tonne	0,75	à	0,97	0,91
Emissions atmosphériques					
à CO <sub>2</sub>	kg	300	à	1000	430
à NOx	kg	1,2	à	3,9	2,4
à SOx	kg	0,5	à	7,1	2,5
à poussières, sans réduction secondaire,	kg	0,2	à	0,6	0,4
à poussières, sans réduction secondaire,	kg	0,002	à	0,05	0,024
à hcl, sans réduction secondaire,	kg	0,02	à	0,08	0,041
à hcl, avec réduction secondaire,	kg	0,01	à	0,06	0,028
à HF, sans réduction secondaire,	kg	0,001	à	0,022	0,008
à HF, avec réduction secondaire,	kg	0,001	à	0,0011	0,003
à métaux, sans réduction secondaire,	kg	0,001	à	0,011	0,006
à métaux, avec réduction secondaire,	kg	0,000	à	0,002	0,001
à H <sub>2</sub> O, évaporation et combustion,	tonnes	0,3	à	10	1,8
Eaux usées	m <sup>3</sup>	0,2	à	9,9	1,6
Déchets à recycler	tonnes	0,002	à	0,006	0,005
Autres déchets	tonnes	0,003	à	0,015	0,005



**Tableau 3.6 : Apports et produits de la fabrication du verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]**

(1) Energie totale (four + autres) nécessaire pour une installation moyenne équipée de fours à combustible fossile.

### 3.3.1 Apports utilisés dans le procédé

<b>Matières premières pour la formation du verre</b>	Sable siliceux, calcin, calcin provenant de la consommation.
<b>Substances intermédiaires et agents modificateurs</b>	Carbonate de sodium. calcaire, dolomite. sulfate de sodium. scories du four feldspath. syénite néphélinique. carbonate de potassium. carbone. poussières filtrées.
<b>Colorants et décolorants</b>	Chromate de fer. oxyde de fer. sulfite de fer. oxyde de cobalt. oxyde de cérium. sélénium ou sélénite de zinc.
<b>Revêtements, à chaud</b>	Chlorures de métal organiques et inorganiques. Principalement dans tétrachlorure. tétrachlorure de titane et chlorure d'étain mono butylique.
<b>Lubrifiants</b>	Lubrifiants à base de polyéthylène et acides gras, par exemple acide oléique.
<b>Combustibles</b>	Fioul. gaz naturel. électricité. butane. propane.
<b>Eau</b>	Réseau public et sources naturelles locales, puits. rivières. lacs.
<b>Matériaux auxiliaires</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique. le papier. le carton et le bois Lubrifiants pour moules. généralement des agents de démoulage au graphite haute température Lubrifiants pour machines. généralement des huiles minérales. Gaz de fabrication. oxygène et dioxyde de soufre. Produits chimiques pour le traitement des eaux pour l'eau de refroidissement et les eaux usées

**Tableau 3.7 : Matières premières et matériaux utilisés dans le secteur du verre d'emballage, COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE Janvier 98,**

Les principales matières premières, employées dans le procédé de fabrication, sont des matières à base de silice, sable et calcin, et les carbonates, carbonate de sodium, dolomite et calcaire. Les matières premières utilisées sont mélangées, dans les proportions nécessaires à obtenir les compositions de verre, décrites au Chapitre 2. Dans la plupart des formules de verre d'emballage les oxydes de silicium, de sodium et de calcium représentent plus de 90 % du verre, SiO<sub>2</sub> 71 - 73 %. Na<sub>2</sub>O 12 - 14 % et CaO 10 - 12 %. Le dioxyde de silicium est principalement présent dans le calcin et le sable. L'oxyde de sodium est contenu dans le calcin et le carbonate de sodium, tandis que l'oxyde de calcium est extrait du calcin, du calcaire et, en pour une plus faible part, de la dolomite.

Un grand nombre de procédés, pour la production de verre d'emballage, emploient de grosses quantités de calcin, provenant à la fois du recyclage des calcins de la fabrication et extérieurs, la moyenne du secteur se situant autour de 48 %. L'emploi de calcin, provenant de la consommation varie beaucoup, entre 0 et >80 %, tandis que dans presque tous les procédés on recycle le calcin du procédé de fabrication, qui constitue environ 10 % de la composition. La proportion des autres matières premières, en particulier le sable, le carbonate de sodium, le calcaire et la dolomite, varie en fonction du calcin, utilisé et de sa composition.

L'emploi de produits, pour le traitement de surface des produits finis, revêtements et lubrifiants, varie d'un procédé à un autre. Toutefois, les quantités de produit utilisées, sont très faibles, par

rapport aux matières premières utilisées, dans la fabrication du verre. En moyenne, une seule ligne de production utilise 2 à 10 kg/jour, d'agents de revêtement et une quantité similaire de lubrifiants.

Les combustibles utilisés varient selon les procédés. Mais en général, il s'agit, pour la fusion du verre, de fioul, de gaz naturel et d'électricité, séparément ou combinés. Les avant-creusets et les galeries de recuit sont chauffés au gaz ou à l'électricité, également employés pour le chauffage des locaux et les services généraux. Le fioul domestique, le propane et le butane sont parfois également utilisés en tant que combustibles d'appoint.

L'eau, dans le secteur de production du verre d'emballage, est principalement utilisée pour le refroidissement des circuits et le nettoyage. L'eau est fréquemment utilisée, en général sous la forme de vapeur, pour humidifier la composition, de 0 à 4 % d'humidité, afin d'éviter la séparation des matières premières et de réduire le transport des poussières, à la sortie du four. L'eau de refroidissement est employée, généralement dans des circuits ouverts ou fermés, pour refroidir les différents équipements, ainsi que les calcins chauds, avec une déperdition qui provient de l'évaporation et de l'épuration. La consommation d'eau et les émissions de vapeur, varient en fonction des conditions locales, c'est à dire par exemple de la température ambiante et la dureté de l'eau.

### 3.3.2 Emissions atmosphériques

#### 3.3.2.1 Matières premières

Dans la plupart des installations modernes, de fabrication du verre d'emballage, les silos et les récipients d'agitation sont munis de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières, pour qu'elles restent en dessous de 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques provenant à la fois des systèmes équipés et non équipés de filtres, dépendront du nombre de transferts, de la taille des granules et de la quantité de matériaux manipulés.

#### 3.3.2.2 Fusion

Dans le secteur, les principales émissions sont atmosphériques et provoquées par les activités de fusion. Les substances émises et les sources correspondantes, sont décrites au Paragraphe 3.2.2.1. La plupart des fours, utilisés dans ce secteur, sont principalement chauffés au combustible fossile, gaz naturel et fioul. Toutefois, étant donné l'importance du secteur, le nombre de fours en fonctionnement est très élevé et les niveaux d'émission sont très différents. Dans les tableaux ci-dessous, les plages de valeurs des émissions concernent, d'un côté, les celles auxquelles ne s'appliquent pas de mesures secondaires et, d'autre part, celles auxquelles s'appliquent des mesures secondaires. Tout en bas de l'échelle, en ce qui concerne les installations auxquelles ne s'appliquent pas de mesure secondaires, certaines techniques primaires sont déjà relativement avancées, alors qu'en haut de l'échelle, aucune mesure spécifique de réduction des émissions ne va probablement être adoptée.

Les niveaux d'émission susmentionnés figurent au Tableau 3.8. La source de ce tableau est une étude statistique, réalisée parmi les membres de l'association professionnelle des producteurs de verre d'emballage FEVE, à partir des données concernant 228 fours à combustible fossile, avec et sans boosting électrique, couvrant tous les types de fours et de produits finis. Ces données se rapportent à des mesures effectuées en 1996 et 1997. Les techniques d'échantillonnage et de mesure techniques ne sont pas standardisées et les données peuvent être uniquement considérées comme indicatives, des valeurs des émissions, à l'époque de l'enquête. Les données relatives aux émissions métalliques ont été fournies uniquement pour 42 % des fours, et les métaux pris en considération peuvent différer.

Environ 30 %, 72/228, des fours pour verre d'emballage, faisant l'objet de l'étude du FEVE, sont équipés de systèmes de réduction secondaires. La réduction secondaire à laquelle on fait référence est celle des poussières, par le biais d'un PE, de façon moindre, d'un filtre à manches, généralement avec désulfuration en amont. Les poussières collectées, dans les filtres, sont recyclées dans tous les cas, dans le procédé de fusion, dans les limites imposées en matière de remplacement des matières premières. La réduction globale des émissions d'oxyde de soufre correspond donc, dans la pratique courante, au remplacement de sulfate dans les matières premières. La désulfuration est considérée comme une réduction secondaire, pour les autres gaz acides, HCl et HF, ayant les mêmes limitations sur l'effet global, en raison du recyclage des poussières. La réduction secondaire de NOx, par SCR, a été installée dans une seule usine de production de verre d'emballage dans l'UE, 4 fours. Mais l'un des fours, au moins, devrait avoir une autorisation d'exploitation 3R.

Des valeurs peu élevées de NOx,  $<600 \text{ mg/Nm}^3$  ou  $<1 \text{ kg/t}$ , peuvent être observées dans certains fours, sans réduction secondaire. Les facteurs, qui permettent d'obtenir ces faibles valeurs, sont décrits au Paragraphe 4.4.2, avec l'indication de leur applicabilité aux installations existantes. Des valeurs élevées sont constatées uniquement dans certains cas spéciaux,  $>2000 \text{ mg/Nm}^3$ , par exemple lorsqu'on emploie des nitrates, en tant qu'agents affinants/oxydants, ou bien pour certains types de fours, dans lesquels les flammes doivent avoir une température élevée et/ou il y a des fuites d'air, à l'intérieur des flammes.

En ce qui concerne le Sox, les valeurs les plus faibles,  $<300 \text{ mg/Nm}^3$ , se réfèrent à des cas où le combustible ne génère pas de grosses quantités de soufre, où la composition contient peu de sulfates et le calcin peu de Sox. Les valeurs élevées sont uniquement dues à l'utilisation de combustibles très chargés en soufre, dont l'emploi diminue progressivement, dans les pays de l'UE.

De faibles valeurs, relatives aux poussières,  $<100 \text{ mg/Nm}^3$ , peuvent être constatées sans réduction secondaire, dans des cas spécifiques. Mais elles restent rares, au moment de la rédaction du présent document. Des valeurs très élevées sont observées,  $>400 \text{ mg/Nm}^3$ , entre autres, en ce qui concerne les émissions non réduites, des fours pour la fabrication de verre au borosilicate. La mesure des émissions de poussières est souvent source d'erreurs, à la fois en ce qui concerne les techniques utilisées et l'équilibre complexe entre les différents composés du soufre. Certaines valeurs, particulièrement élevées ou particulièrement faibles, relatives à la concentration de poussières, pourraient donc provenir d'erreurs de mesure.

En ce qui concerne les faibles valeurs de HCl,  $<10 \text{ mg/Nm}^3$ , celles-ci peuvent être constatées, sans réduction secondaire, en présence de carbonate de sodium, à faible contenu de chlorure, provenant de gisements naturels, et de l'utilisation massive de calcin. A noter que, dans le cas d'importants taux de recyclage, associés au recyclage des poussières collectées dans les filtres, le chlorure se formera progressivement, à l'intérieur des gaz d'échappement bruts, surtout lorsque le chlorure provenant du traitement superficiel "à chaud" est réduit, à l'intérieur du même système. Dans ce cas, la réduction secondaire, associée à la désulfuration, ne sera pas forcément liée aux valeurs d'émission les plus faibles, surtout lorsque les conditions de désulfuration ne sont pas optimales, pour effectuer la déchloration, avec le même agent absorbant. Des valeurs élevées,  $>50 \text{ mg/Nm}^3$ , seront généralement dues à un carbonate de sodium industriel, très chargé en chlorure.

Les fluorures se trouvent sous la forme d'impuretés accidentelles, dans certaines matières premières naturelles. Ils peuvent être présents, en tant que scories, dans le verre recyclé, entre autres l'opale, contenant des fluorures, bien qu'exclue des spécifications relatives au calcin, qui pourrait être présente en petites quantités. On ne peut pas généraliser les faibles valeurs, sans réduction secondaire, ou les valeurs élevées qui se rapportent à des cas particulièrement favorables ou défavorables.

De faibles concentrations de métaux,  $<1 \text{ mg/Nm}^3$ , peuvent être observées dans des gaz d'échappement non réduits, dans des situations favorables, en particulier en présence de faibles

niveaux de calcin, pour les impuretés du plomb, ainsi que dans des combustibles et des gaz à faible contenu de vanadium et en l'absence de sélénium, dans les matières premières, ce qui est le cas pour tous les types de verre sauf certains flints blancs. Des valeurs élevées,  $>5 \text{ mg/Nm}^3$ , sont généralement associées à d'importantes quantités de calcin, plomb, à la combustion au fioul ou à la production de flint blanc, sélénium.

Les données figurant au Tableau 3.9 proviennent de l'étude FEVE, déjà mentionnée pour celles du Tableau 3.8, et sont également réparties entre les usines mettant en place une réduction secondaire et celles n'utilisant pas de réduction secondaire, 72/228 et 156/228 fours respectivement pour le cas principal de réduction de poussières. La plage de valeurs moyenne de 80 %, P10 - P90, est indicative de la performance de la majorité des installations, au niveau de l'ensemble de l'Union Européenne en 1996 – 1997.

	valeurs des émissions totales pour le secteur du verre d'emballage			
Type d'émission	Sans réduction secondaire Avec ou sans mesures primaires		Avec réduction secondaire	
	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t de verre fondu	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t de verre fondu
NOx ,sous forme de NO <sub>2</sub>	400 à 5000	0,6 à 11,7	<400	<0,74
SOx sous forme de SO <sub>2</sub>	100 à 4500	0,2 à 9,8	100 à 1637	0,2 à 3,4
Poussières	40 à 800	0,1 à 1,9	1 à 32	0,002 à 0,22
HCl	5 à 62	0,01 à 0,12	7 à 30	0,01 à 0,07
HF	1 à 70	≤ 0,16	≤ 1 à 6	≤ 0,02
Métaux	≤ 1 à 16	≤ 0,017	≤ 1 à 3	≤ 0,003
Taux de calcin	5 à 95 %			
Charge moyenne	25 à 600 t/jour			
Energie spécifique Uniquement pour la fusion Suralimentation comprise	3,2 à 12,2 [GJ/t]			

**Tableau 3.8 : Emissions totales, constatées pour l'ensemble des fours de production de verre d'emballage, avec mesures de réduction primaire et secondaire.**  
Cf. remarques Tableau 3.9 ci-dessous

Type d'émission	Moyenne de 80 % P10 - P90 des fondoirs à verre du verre d'emballage Sans réduction secondaire Avec ou sans mesures primaires		Moyenne de 80 % P10 - P90 des fondoirs à verre du verre d'emballage Avec réduction secondaire	
	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t de verre fondu	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t de verre fondu
NOx sous forme de NO <sub>2</sub>	600 à 2000	1,2 à 3,9	<400	<0,74
SOx sous forme de SO <sub>2</sub>	250 à 3200	0,5 à 7,2	230 à 1500	0,4 à 2,8
Poussières	100 à 270	0,2 à 0,6	2 à 32	0,002 à 0,05
HCl	10 à 40	0,02 à 0,08	7 à 30	0,01 à 0,06
HF	1 à 11	≤ 0,027	≤ 1 à 5	≤ 0,011
Métaux	0,2 à 8	≤ 0,016	≤ 1	≤ 0,002
Taux de calcin	18 à 80 %			
Charge typique	100 à 360 t/jour			

Energie spécifique Uniquement pour la fusion Suralimentation incluse	3,9 à 6,4 [GJ/t]
---	------------------

**Tableau 3.9 : Moyenne de 80% des émissions des fours du secteur de production du verre d'emballage avec mesures de réduction primaire ou secondaire**

Remarques :

- Le rapport entre les émissions en mg/Nm<sup>3</sup> et kg/tonne est donné par le coefficient de volume Nm<sup>3</sup> gaz d'échappement/tonne de verre obtenu, par rapport à la consommation de combustible, au type de combustible et au taux de calcin, le taux de calcin rectifie le dégazage des matières premières,
- Les conditions de référence sont les suivantes : sec, température 0°C, 273K, pression 101,3 kPa, 8 % d'oxygène par volume.

### 3.3.2.3 Activités en aval

L'application de revêtements de surface à chaud et à froid peut provoquer l'émission de fumées et de vapeurs, principalement du HCl et des composés de l'étain. Les niveaux d'émission varient d'un procédé à l'autre et dépendent de multiples facteurs. Les Directives du VDI allemand, VDI 2578, citent les concentrations suivantes, qui auraient été constatées dans les gaz d'échappement générés par les opérations de revêtement à chaud.

HCl	de 30 à 95 mg/m <sup>3</sup> .
Etain (particules)	de 0,006 à 10 mg/m <sup>3</sup> .
Etain (gazeux)	de 0,4 à 15 mg/m <sup>3</sup> .

Les émissions massiques sont relativement faibles, en raison des faibles quantités de substances utilisées, et les concentrations dépendent en grande partie de la quantité d'air évacué employé. Les méthodes à utiliser, pour le contrôle de ce type d'émission, sont décrites au Chapitre 4. Jusqu'ici le contrôle, de ce type de substances, semble s'être limité au contrôle des niveaux d'exposition, sur le lieu de travail. Lorsque des gaz d'échappement, contenant du HCl, généré par le revêtement à chaud, sont mélangés avec des gaz d'échappement, ayant un contenu significatif de composés organiques, on doit tenir compte du risque de formation de dioxine et de furanne.

Les procédés de formage sont extrêmement mécanisés, ce qui peut provoquer des brouillards d'huiles lubrifiantes. Ces brouillards sont toutefois maîtrisés, au niveau de l'exposition, sur le lieu de travail, et ne représentent pas un risque important d'émissions atmosphériques. Cela dit, ils représentent un risque de contamination aux hydrocarbures, pour les eaux usées.

### 3.3.3 Emissions aqueuses

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Comme nous l'avons dit plus haut, l'eau est principalement utilisée, pour le refroidissement des systèmes hydrauliques, des calcins chauds et l'humidification de la composition. Les émissions aqueuses sont générées principalement par l'épuration des systèmes de refroidissement, et par l'écoulement des eaux de nettoyage et des eaux de surface. Les eaux de nettoyage ne comportent aucun risque particulier, en dehors de ceux qui sont communs à toute installation industrielle, entre autres les solides inertes et l'huile. Les eaux usées des systèmes de refroidissement, contiennent généralement des sels dissous et des produits chimiques, pour le traitement de l'eau. La qualité de l'eau de surface dépendra du niveau de séparation du réseau de drainage et de la propreté du site.

Seul le circuit de fragmentation et de refroidissement, des calcins chauds, est spécifique à ce secteur. Cette eau recyclée peut contenir de fines particules de verre, générées par la fragmentation et par l'action des racloirs mécaniques, utilisés pour éliminer le verre, dans les bacs à eau. Les goulottes, à travers lesquelles passe le verre, pour arriver au bac collecteur, contiennent également de petites quantités d'huile, provenant des machines, ainsi que de l'huile et des mélanges solubles huile/eau, utilisés dans les mécanismes de découpe et de livraison. Le circuit a donc, généralement un séparateur d'eau et d'huile, qui sert également à conférer l'inertie thermique suffisante au système, pendant le remplacement des moules ou en cas de problème, sur les machines de formage, lorsque d'importantes quantités de verre doivent être refroidies. Les particules solides de verre sont séparées, à l'intérieur des matières premières. Le refroidissement, en circuit ouvert, est généralement utilisé pour éviter des dysfonctionnements graves, pendant la phase de refroidissement de grandes quantités de verre, des pertes provenant des fours ou d'autres anomalies importantes, causant l'interruption des opérations de formage.

En dehors des eaux usées internes, les émissions ne contiennent généralement que des déchets solides de verre, de l'huile et des produits chimiques, pour le traitement des eaux usées des circuits de refroidissement. Des techniques simples de contrôle de la pollution, telles que le tassement, le tamisage, l'utilisation de séparateurs d'huile et la neutralisation, sont appliquées.

### 3.3.4 Autres déchets

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

L'une des caractéristiques, du secteur du verre d'emballage, est que dans 99% des cas, tous les déchets de la fabrication peuvent être recyclés. Ceci inclut les calcins, provenant des opérations de formage, et de contrôle de la qualité, mais aussi les déchets de la manutention des matières premières, les poussières des systèmes de réduction et les dépôts de sulfate qui se forment dans les conduits d'échappement des fours.

Au terme du cycle de vie d'un four, toute la structure réfractaire est démantelée et remplacée. Ces opérations génèrent entre 500 et 2000 tonnes de déchets de réfractaires, qui sont d'abord triés et dont une grande partie est ensuite destinée à d'autres usages. Seule une petite partie de ces déchets est inapte à toute réutilisation et doit être mise à la décharge, après avoir subi un traitement approprié, si nécessaire. Certains matériaux, par exemple les réfractaires au silice, peuvent être broyés et recyclés dans le four. Toutefois, bien que la faisabilité technique de ce procédé ait été prouvée, son coût est généralement plus élevé que celui d'autres opérations, réutilisation ou élimination.

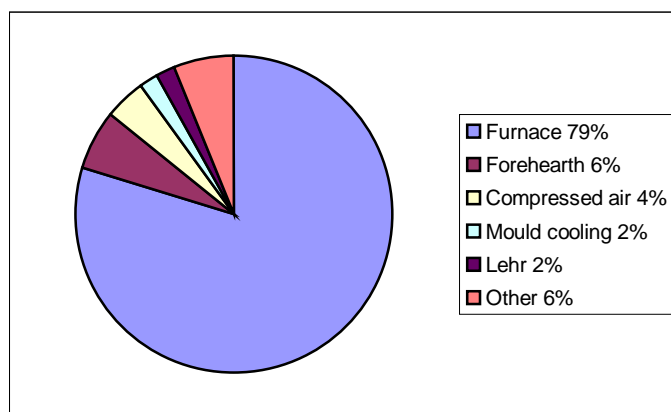
Les matières premières, pour la fabrication du verre, sont généralement livrées en vrac, et ne génèrent donc pas de déchets d'emballage. Les déchets, provenant de l'emballage des produits finis, plastique, carton et bois, sont généralement réutilisés ou recyclés, par les fournisseurs ou par d'autres canaux appropriés. D'autres déchets, non spécifiques à ce secteur, par exemple les huiles usées, les fûts et les autres matériaux d'emballage, le papier, les batteries, les chiffons imprégnés d'huile, etc., sont éliminés par des moyens traditionnels ou, si possible, recyclés par une société externe.

### 3.3.5 Energie

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm14 ETSU]

L'énergie, nécessaire pour la fusion, représente environ 75 % de l'apport énergétique total, pour la fabrication du verre d'emballage. D'autres domaines, où la consommation d'énergie est significative, sont les avant-creusets, les opérations de formage, air comprimé et air de refroidissement des moules, le recuit, le chauffage de l'usine et des services généraux. La consommation moyenne d'énergie, par phase de procédé de production, est illustrée par le Schéma 3.1.





**Figure 3.1 : Consommation d'énergie dans une usine moyenne de fabrication de verre d'emballage**

Le fioul lourd ou le gaz naturel sont les principales sources d'énergie pour la fusion, parfois avec un faible pourcentage de suralimentation, jusqu'à 5 %. Les exemples de fusion, entièrement électrique, sont rares. Les avant-creusets et les galeries de recuit sont chauffés au gaz ou à l'électricité. L'énergie électrique est utilisée, pour les compresseurs à air et les ventilateurs, nécessaires dans le procédé de fabrication. Parmi les services généraux figurent le pompage de l'eau et la génération de vapeur, pour le stockage du fioul et le chauffage des oligo-éléments, l'humidification, le chauffage de la composition et, parfois, le chauffage des locaux. Dans certains cas, les fours de grandes dimensions ont été équipés de chaudières à récupération, pour produire une partie ou la totalité de la vapeur requise.

La consommation d'énergie nécessaire, dans le procédé, dépend de toute une série de facteurs, dont les principaux ont été décrits au Paragraphe 3.2.3. Les consommations d'énergie constatées dans le secteur sont extrêmement variables, cf. Tableau 3.8. Toutefois, on estime que la majorité des usines ont une consommation comprise entre 4,5 et 7,0 GJ/tonne, de verre fondu et 6,5 et 9,0 GJ/tonne de produit fini. Pour certains produits de très haute qualité, ce chiffre peut être beaucoup plus élevé.

### 3.4 Verre plat

Le principal produit de la fabrication du verre plat est, bien entendu, le produit fini, qui correspond à environ 70 % de l'apport de matières premières. Le reste est constitué en grande partie d'émissions atmosphériques de 10 à 20 %, contenant principalement du CO<sub>2</sub>, généré par la décomposition des carbonates et du calcin, dans une proportion d'environ 10 à 20 %, provenant de la découpe des rives, du changement de produits et des ruptures. Le calcin est généralement recyclé en continu dans le four, le produit représentant ainsi environ 85 % de l'apport de matières premières.

#### 3.4.1 Apports utilisés dans le procédé

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Les compositions sont généralement moins variées, dans le secteur du verre plat, que dans les autres secteurs de production de l'industrie du verre. Toutefois, certains producteurs peuvent choisir des procédés légèrement différents, pour réaliser la composition finale, en fonction de leurs préférences ou de changements dans l'approvisionnement des matières premières. Notamment, il peut y avoir des différences dans la quantité de calcin utilisée, dans le type de colorants employés et dans les procédés de revêtement, sur la chaîne de production. Les matières premières de base, utilisées dans le secteur, figurent dans le tableau ci-dessous.

<b>Matières premières pour la composition du verre</b>	sable siliceux, calcin généré par le procédé, parfois provenant de la consommation
<b>Matières intermédiaires et agents modificateurs</b>	Carbonate de sodium, calcaire, dolomite, sulfate de sodium anhydre, sulfate de calcium et gypse, nitrate de sodium, syénite néphélinique, feldspath, scories du four, carbone, poussières collectées dans les filtres
<b>Agents colorants</b>	bichromate de potassium, oxyde de fer, oxyde de cobalt, oxyde de cérium, sélénium ou sélénite de zinc
<b>Revêtement sur la chaîne</b>	Composés du silicium tétrachlorure de silicium, carbonates de silicium, halogénures d'acides forts, composés organiques et inorganiques de l'étain
<b>Combustibles</b>	Fioul, gaz naturel, électricité, fioul domestique d'appoint
<b>Eau</b>	Réseau hydrique et sources naturelles locales puits, rivières, lacs etc.
<b>Matériaux auxiliaires</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique, le papier, le carton et le bois Lubrifiants pour moules, généralement des agents de démoulage au graphite haute température Lubrifiants pour machines, généralement des huiles minérales Gaz de fabrication, oxygène et dioxyde de soufre Etain dans le bain de float Produits chimiques pour le traitement des eaux pour l'eau de refroidissement et les eaux usées

**Tableau 3.10 : Matières premières utilisées dans le secteur du verre plat**

Les principaux apports, au procédé de production, sont les matières premières contenant du silice, sable et calcin, et les carbonates, carbonate de sodium, dolomite et calcaire. Les matières premières utilisées, dans la composition, sont mélangées, dans les bonnes proportions, afin de produire les compositions, décrites au Chapitre 2. Dans les compositions habituelles de verre float, les oxydes de silicium, de sodium, de calcium et de magnésium représentent environ 98 % du verre,  $\text{SiO}_2$  72,6 %,  $\text{Na}_2\text{O}$  13,6 %,  $\text{CaO}$  8,6 % et  $\text{MgO}$  4,1 %. Le dioxyde de silicium est contenu dans le sable et le calcin, des quantités moindres d'autres oxydes étant également contenues dans le calcin. L'oxyde de sodium est contenu principalement dans le carbonate de sodium, l'oxyde de calcium dans la dolomite et le calcaire et l'oxyde de magnésium dans la dolomite.

Dans 99% des cas, le calcin provenant de la production du verre plat est directement recyclé dans le four. Le verre plat est généralement transformé, en d'autres produits, destinés aux secteurs du bâtiment et de l'automobile, et le calcin généré par ces transformations ultérieures est également recyclé dans certains cas. La quantité de calcin recyclée est généralement limitée par la disponibilité de calcin de la qualité requise et par sa compatibilité chimique. La quantité totale de calcin, chargée dans le four est en moyenne de 20 %. Mais elle peut aller de 10 % à 40 %, pour les fours de float et atteindre plus de 80 %, pour les autres types de verre plat. Les calcins, générés par le procédé de fabrication, sont de plus en plus souvent réutilisés ou recyclés. Dans les fours, de production du verre plat, des déchets légèrement contaminés peuvent être utilisés par des fabricants de verre d'emballage ou d'autres types de verre. Probablement 95 % des calcins, générés par le procédé de fabrication, sont recyclés d'une façon ou d'une autre.

Les opérations de revêtement, sur la chaîne de production, sont très variées et très spécifiques. Parmi les matières premières, utilisées dans ce procédé, certaines sont indiquées au Tableau 3.10.

Tout comme dans d'autres secteurs de l'industrie du verre, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement, le nettoyage et l'humidification de la composition. Le verre plat est fabriqué sous forme de ruban continu, qui sort des galeries de recuit à une température d'environ 200°C. La plupart de l'eau utilisée, à l'intérieur de l'usine, sert à refroidir/laver ce ruban chaud et n'est pas contaminée. Elle peut contenir du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . La consommation d'eau et les émissions de vapeur peuvent varier, en fonction des conditions locales, par exemple la température ambiante et la dureté de l'eau.

Les fours, pour la production de verre plat, sont presque exclusivement alimentés au fioul lourd ou au gaz naturel, le boosting électrique pouvant représenter, dans certains cas, 5 % de l'apport énergétique. Certains fours électriques, de petites dimensions, peuvent être utilisés pour des applications spécifiques et un certain nombre de fours oxycombustion, ont été récemment mis en service aux États Unis.

### 3.4.2 Emissions atmosphériques

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

#### 3.4.2.1 Matières premières

Dans la plupart des installations modernes, de production de verre plat, les silos et les bacs d'agitation sont équipés de systèmes de filtrages, aptes à réduire les émissions de poussières, jusqu'à une valeur inférieure à 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques, générées à la fois par les systèmes munis de filtrage et par ceux dépourvus de filtrage, dépendent du nombre de transferts et de la quantité de matières premières manipulées.

#### 3.4.2.2 Fusion

Dans le secteur de production du verre plat, le potentiel d'émission le plus élevé est constitué par les émissions atmosphériques, générées par les opérations de fusion. Les substances émises et les sources correspondantes, figurent au Paragraphe 3.2.2.1. Presque tous les fours utilisés dans ce secteur de production sont du type à combustible fossile, gaz naturel et fioul, à brûleurs transversaux et régénératifs.

Les valeurs des émissions atmosphériques sont résumées au Tableau 3.11 ci-dessous. Dans ce tableau, les chiffres relatifs aux fours dépourvus de systèmes de réduction sont séparés des fours pourvus de techniques secondaires de réduction. Les données concernent à la fois les fours au gaz naturel et au fioul, pour la production de verre float transparent, dans des conditions normales de fonctionnement. Elles prennent en considération uniquement les années 1996 et 1997.

	Fours dépourvus de système de réduction mg/m <sup>3</sup> kg/tonne de verre fondu	Fours pourvus de techniques de réduction primaires/secondaires mg/m <sup>3</sup> kg/ tonne de verre fondu
Oxydes d'azote sous forme de NO <sub>2</sub>	1800 à 2870 (1,7 à 7,4)	495 à 1250 (1,1 à 2,9)
Oxydes de soufre, comme le SO <sub>2</sub>	365 à 3295 (1,0 à 10,6)	218 à 1691 (0,54 à 4,0)
Particules	99 à 280 (0,2 à 0,6)	5,0 à 40 (0,02 à 0,1)

Fluorures (HF)	<1,0 à 25 (<0,002 à 0,07)	<1,0 à 4,0 (<0,002 à 0,01)
Chlorures (HCl)	7,0 à 85 (0,06 à 0,22)	4,0 à 30 (<0,01 à 0,08)
Métaux	<1,0 à 5,0 (<0,001 à 0,015)	<1,0 (<0,001)

**Tableau 3.11 : Niveaux d'émission concernant les fours avec et sans systèmes de réduction, pour la production de verre plat**

**Les conditions de référence sont les suivantes : milieu sec, température 0°C (273K), pression 101,3 kPa, 8 % d'oxygène par volume.**

Les fours dépourvus de système de réduction fonctionnent normalement, sans aucune technologie spécifique de contrôle des émissions. Les valeurs figurant dans le tableau sont des mesures effectivement constatées, mais s'agissant de données relatives aux années 1996 et 1997, elles ne tiennent pas compte d'un résultat important. Il s'agit des résultats de l'usine Saint-Gobain d'Aniche, qui applique le procédé FENIX et qui a pu obtenir, en 1998, des niveaux d'émission de NOx de 510 mg/Nm<sup>3</sup> et 1,1 kg/tonne de verre fondu, essentiellement avec des techniques primaires.

Pour les fours, dépourvus de systèmes de réduction, les valeurs maximales et minimales n'étaient pas sensiblement différentes des valeurs à 80 %, et il y avait trop de fours équipés de systèmes de réduction, pour pouvoir réaliser une analyse significative sur la base de 80 %, par exemple il n'y avait que 2 fours qui appliquaient des techniques de réduction du NOx. Par conséquent, les valeurs à 80 % ne sont pas présentées.

Pour les fours, non équipés de systèmes de réduction, les émissions les plus élevées de Nox, provenaient d'installations au gaz, extrêmement chargées, tandis que les plus faibles concernaient des fours au fioul. Les deux émissions les plus réduites concernaient un four qui appliquait le système 3R, uniquement sur deux ouvertures, ainsi qu'un four fonctionnant avec la technique de SCR.

Les émissions les plus élevées de Sox, pour les fours dépourvus de systèmes de réduction, concernent des installations au fioul, alimentées par du combustible très chargé en soufre, tandis que les plus faibles sont associées à des installations au gaz, peu chargées. Les émissions les plus élevées de poussières, pour les fours dépourvus de systèmes de réduction, concernent des fours alimentés au fioul, tandis que les plus faibles concernent des fours à gaz, peu chargés, utilisant d'importantes quantités de calcin. Pour les fours non équipés de systèmes de réduction, les émissions les plus élevées de HCl et HF ont été constatées dans des installations employant des matières premières fortement chargées en Cl et en F. Les émissions les plus importantes de métaux, constatées dans des fours dépourvus de systèmes de réduction, concernent des installations alimentées au fioul, ou les installations appliquant des procédés comportant l'utilisation d'agents colorants, Se, Co, Fe et Cr, tandis que les émissions les plus faibles sont associées à des installations alimentées au gaz. Les valeurs des émissions de Sox, de poussières, de HCl, de HF et de métaux, relatives à des fours équipés de systèmes de réduction, concernaient des installations fonctionnant avec des systèmes de réduction des particules, associés à des systèmes de lavage des gaz acides, afin de se conformer aux conditions nécessaires pour l'obtention des autorisation d'exploitation, au niveau local. Pour les métaux, les émissions étaient en dessous des limites de détection.

### 3.4.2.3 Activités en aval

Les émissions de vapeurs d'étain, provenant des bains de float, étaient très faibles et elles ont fait l'objet d'un contrôle uniquement en ce qui concerne les niveaux d'exposition, sur le lieu de travail. Ce problème n'est pas traité de manière plus détaillée dans le présent document.

Les procédés d'application du revêtement au verre plat, sur la chaîne de fabrication, varient d'une installation à l'autre, tout comme les matières premières utilisées et les émissions polluantes, générées par cette opération. Toutefois, les émissions contiennent généralement des gaz acides, HF, HCl, et des particules fines, oxydes de silicium et d'étain. Ce type de procédé est généralement soumis aux normes locales générales, en matière d'environnement, et les systèmes de réduction sont installés, conformément aux dites normes. Par exemple, HCl 10 mg/m<sup>3</sup>, HF 5 mg/m<sup>3</sup>, particules 20 mg/m<sup>3</sup> et composés de l'étain 5 mg/m<sup>3</sup>.

### 3.4.3 Emissions aqueuses

Comme indiqué plus haut, l'eau est principalement utilisée, dans ce secteur, pour le refroidissement, le nettoyage et l'humidification de la composition. Les émissions aqueuses se limitent à l'eau, évacuée lors de l'épuration des circuits de refroidissement, ainsi qu'à l'écoulement de l'eau de nettoyage et des eaux de surface. Les eaux de nettoyage ne présentent pas de risques particuliers, en dehors des risques communs à toutes les installations industrielles, tels que la formation de solides inertes et d'huiles. Les eaux provenant de l'épuration des systèmes de refroidissement, contiennent des sels dissous et des produits chimiques, pour le traitement des eaux usées. La qualité de l'eau de surface dépend du degré de séparation, dans le drainage, et de la propreté du site.

En dehors des eaux usées, provenant de la consommation interne, les circuits d'évacuation des eaux, ne contiennent généralement que des déchets solides de verre, de l'huile et des produits chimiques, pour le traitement des eaux usées, des circuits de refroidissement. Des techniques simples de contrôle de la pollution, telles que le tassement, le tamisage, l'utilisation de séparateurs d'huile et la neutralisation, sont appliquées.

### 3.4.4 Autres déchets

Lorsque cela est possible, les poussières provenant des matières premières, contenues dans la composition, sont replacées dans les silos de stockage et réutilisées, dans le procédé de fabrication. Les déchets de la composition sont progressivement réintroduits, dans le procédé, par l'inclusion de petites quantités, dans les compositions suivantes. En moyenne, 99 % des calcins générés pendant les phases finales de la fabrication du verre, ainsi que les rognures, les rejets et le verre endommagé sont refondus.

Au terme du cycle de vie du four, la structure réfractaire, parfois à l'exclusion des régénérateurs, est démantelée et remplacée. Tout comme dans le secteur de production du verre d'emballage, ce type de matériau est récupéré, autant que possible, pour être réutilisé ou revendu. Les problèmes, relatifs aux matériaux chargés en chrome, sont décrits au Paragraphe 3.2.2.3.

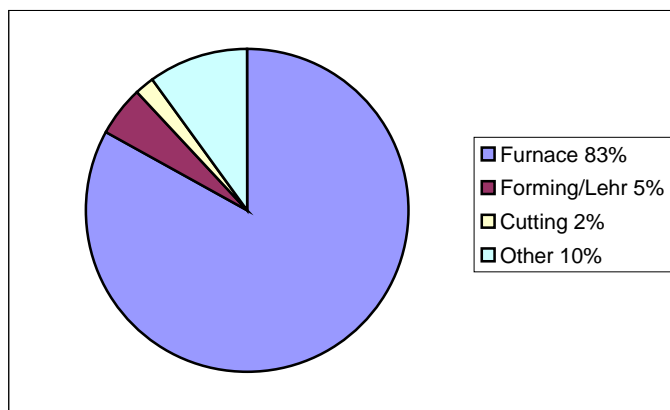
La plupart des matières premières utilisées, dans la fabrication du verre, sont livrées en vrac et ne génèrent donc pas de déchets d'emballage. Les déchets provenant de l'emballage des produits finis, plastique, carton et bois, sont généralement réutilisés ou recyclés, dans les limites du possible. Les autres déchets, non spécifiques à ce secteur sont éliminés par les moyens habituels.

### 3.4.5 Energie

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm14 ETSU]

La distribution de la consommation d'énergie, pour les procédés typiques de production du verre float, est illustrée par la Figure 3. ci-dessous, la consommation d'énergie dans certains procédés particuliers pouvant, toutefois, varier légèrement. Comme on peut le constater, plus de trois

quarts de l'énergie utilisée, dans une installation de production de verre, est consommée dans des opérations de fusion. Le formage et le recuit absorbent 5 % du total, tandis que l'énergie restante est employée pour les services généraux, les systèmes de contrôle, l'éclairage, le chauffage de l'usine et les opérations de post-formage, telles que la vérification et l'emballage.



**Figure 3.2 : Répartition de l'utilisation d'énergie dans une installation moyenne de production de verre float**

Les fours, pour la production de verre float, sont presque exclusivement alimentés au fioul lourd ou au gaz naturel, le boosting électrique atteignant parfois 5 %. Une grande partie des fours peuvent être alimentés au fioul ou au gaz ou les deux en même temps, sur différents brûleurs. Des fours électriques sont également utilisés, sur une petite échelle, pour des applications spéciales. Un certain nombre de fours oxycombustion ont commencé à fonctionner aux Etats Unis, à partir de 1998.

Les avant-creusets, pour la production de verre coulé, et les galeries de recuit, sont chauffés au gaz ou à l'électricité. L'énergie électrique est employée pour faire fonctionner les compresseurs à air, ainsi que les ventilateurs nécessaires, dans le procédé de fabrication. Parmi les services généraux figurent le pompage de l'eau et la génération de vapeur, pour le stockage du fioul et le chauffage des oligo-éléments, l'humidification/le chauffage de la composition et, parfois, le chauffage des locaux, dans certains cas, des fours de grandes dimensions ont été équipés de chaudières à récupération, pour produire une partie ou la totalité de la vapeur requise.

La consommation d'énergie, relative à ce procédé de production, dépend de nombreux facteurs, les principaux sont décrits au Paragraphe 3.2.3. Les plages de valeurs, relatives à la consommation d'énergie, sont étroites, le type de fours utilisés étant peu varié. Les niveaux de consommation d'énergie pour opérations de fusion, varient entre 5,5 et 8,0 GJ/tonne de verre fondu, l'énergie globalement nécessaire, pour ce type de production, dans son ensemble, étant généralement inférieure à 8,0 GJ/tonne.

### 3.5 Fibres de verre à fil continu

Le produit principal de ce procédé c'est le produit fini, qui peut représenter entre 55 % et 80 % de l'apport de matières premières. Les pertes correspondent principalement aux émissions atmosphériques, aux résidus solides et aux émissions liquides. Le verre fondu représente environ de 80 à 85 %, de l'apport en matières premières. La déperdition est représentée en grande partie par les émissions gazeuses, notamment de CO<sub>2</sub>, générées par la décomposition des carbonates. Les déchets de fibres et de verre drainé peuvent représenter entre 10 et 30 %, des apports utilisés dans le procédé. Le Tableau 3.12 ci-dessous montre la synthèse de la consommation et de la production moyennes, dans la fabrication de fibres de verre à fil continu



		Quantité/tonne de produit			
		Consommation	Unité	Production	Unité
<b>Matières premières pour la fabrication du verre</b>					
	Silice	300 à 457	kg		
	Colémanite	141 à 250	kg		
	Carbonate de calcium	300 à 411	kg		
	Argile	395 à 544	kg		
	Fluorine	0 à 20	kg		
	Autres	3 à 153	kg		
<b>Emissions atmosphériques</b>					
	Poussières sans système de réduction			1,4 à 4	kg
	Poussières avec système de réduction			0,02 à 0,24	kg
	CO <sub>2</sub> généré par la décomposition des matières premières			120 à 200	kg
	CO <sub>2</sub> généré par la combustion			450 à 1000	kg
	Vapeur d'eau générée par la combustion / décomposition des matières premières			180 à 800	kg
	Eau générée par le séchage			75 à 200	kg
	NO <sub>x</sub> , sous forme de NO <sub>2</sub>			2,6 à 6,7	kg
	SO <sub>x</sub> , sous forme de SO <sub>2</sub> ,			1 à 8	kg
	HF			0 à 2	kg
	HCl			0,03 à 0,12	kg
	Eau provenant de l'évaporation. du refroidissement			3200	kg
	VOC dans la zone de formage, fours...			0,1 à 0,5	kg
<b>Synthèse relative aux agglomérants</b>					
comme fourni	Polymères, ~50 % solides	20 à 40	kg		
comme fourni	Silane	1 à 2	kg		
comme fourni	Lubrifiants	1 à 5	kg		
comme fourni	Autres	0 à 10	kg		
solides secs	Agglomérant sur le verre			4 à 20	kg
solides secs	Agglomérants dans les eaux usées			1 à 13	kg
solides secs	Agglomérants dans les déchets solides			<1	kg
	Agglomérants dans l'atmosphère, cf. VOC ci-dessus				kg
<b>Contenu en eau</b>	Total	5000 à 20000	kg		
	Ajoutée pour l'agglomérant	<200	kg		
	Pour le refroidissement, ajoutée,	>1500	kg		
	Pour la vaporisation, et le nettoyage	>3000	kg		
	dans les calcin			10 à 20	kg
	dans les circuits d'évacuation des eaux			1500 à >6000	kg
	dans l'atmosphère, fours			100 à 200	kg
<b>Déchets solides, solides secs,</b>					
	Fibres de verre			60 à 250	kg
	Déchets d'agglomérants			1 à 13	kg
<b>Energie</b>	Total	22,3 à 36	GJ		
	Energie nécessaire à la fusion, Four + avant-creusets	11,2 à 23	GJ		
	Energie nécessaire au formage, y compris les coussinets. Les bobinoirs, les hachoirs, etc.	2,5 <sup>(1)</sup>	GJ		
	Energie nécessaire aux traitements, traitement thermique, bobinoirs, hachoirs, etc.	2,2 <sup>(1)</sup>	GJ		
	Energie nécessaire aux installations	1,1 <sup>(1)</sup>	GJ		
	Chaleur évacuée par les cheminées			1,8 à 2,9	GJ

**Tableau 3.12 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production dans le secteur des fibres de verre [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]**  
 (1 Un exemple de four

### 3.5.1 Apports utilisés dans le procédé

La composition chimique des fibres varie en fonction du type de verre et de l'utilisation finale. Elle est généralement exprimée en termes d'oxydes, dégagés par les éléments qu'elle contient. Il n'est pas facile d'identifier une composition typique, en dehors de celle indiquée au Tableau 3.12 ci-dessus. Les matières premières de base sont sélectionnées et mélangées, pour obtenir la composition de verre souhaitée après la fusion. Les types de verre et les compositions les plus courants figurent au Chapitre 2. Le Tableau 3.13 indique les principales matières premières employées pour obtenir ces compositions.

<b>Matières premières pour la composition du verre</b>	Sable siliceux
<b>Matières intermédiaires et agents modificateurs</b>	Carbonate de calcium, oxyde de calcium, silicate d'alumine, colémanite, borate de calcium, borax, acide borique, feldspath, fluorine, sulfate de calcium, carbonate de sodium, carbonate de potassium, sulfate de sodium, oxyde de zinc, oxyde de titane ou rutil, oxyde de zirconium dolomite, oxyde de fer
<b>Matériaux de revêtement :</b>	Les revêtements sont fonction de l'utilisation finale du produit, les plus courants sont les filmogènes acétate de polyvinyle, amidon, polyuréthane, résines époxy, les agents d'accrochage silanes organofonctionnels, modificateurs de pH acide acétique, acide chlorhydrique, sels d'ammonium et lubrifiants huiles minérales, tensioactifs
<b>Agglomérants pour produits secondaires</b>	Polyvinyle acétate, poudres de polyesters saturés, poudres de résine phénolique
<b>Combustibles :</b>	Fioul, gaz naturel, électricité
<b>Eau :</b>	Réseau hydrique et sources naturelles locales puits, rivières, lacs...
<b>Matériaux secondaires</b>	Emballages y compris plastique, papier, carton etc. Gaz générés par le procédé, oxygène Produits chimiques pour le traitement des eaux, pour le refroidissement et les eaux usées

**Tableau 3.13 : Matières premières et substances utilisées dans la production de fibres de verre à fil continu**

Les principaux apports sont le sable siliceux, les alcalis et les alcalis de terre, les carbonates de métaux et les oxydes, et les matières premières, contenant de l'alumine et du bore. Dans la composition du verre E les oxydes de silicium, de sodium, de potassium, de calcium, de magnésium, de bore et d'aluminium, représentent plus de 95 % de la composition du verre. Les principaux oxydes et les matières dont ils sont issus sont le  $\text{SiO}_2$ , de 53 à 60 % de sable, le  $\text{CaO}+\text{MgO}$ , de 20 à 24 % de calcaire, le dolomite,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , de 0 à 10 % de colémanite, le borax, etc., l' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de 11 à 16 % d'alumine et  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , <2 % de carbonate de sodium/carbonate de potassium.

Les revêtements représentent une très petite partie de la masse du produit, en moyenne entre 0,5 % et 2 %. Ils sont principalement constitués de solutions aqueuses de polymères, en moyenne 50 % de solides, et de petites quantités d'autres matières, mentionnées au Tableau 3.13.

L'eau est utilisée pour le refroidissement, le nettoyage, la préparation des revêtements et, dans certains cas, les systèmes de dépoussiérage par voie humide. L'une des caractéristiques principales de la fabrication des fibres de verre est la grande quantité d'eau, nécessaire pour le refroidissement. Chaque coussinet nécessite de l'eau, pour réduire très rapidement la température du fil de verre de 1 250°C, à la température ambiante. Ce refroidissement est réalisé en transférant la chaleur à des barres métalliques, situées près des extrémités des coussinets, et

en refroidissant avec de l'eau, en soufflant de l'air froid sur les fils et en vaporisant de l'eau. L'eau de refroidissement est également nécessaire, autour du four et des avant-creusets. L'eau de refroidissement est généralement contenue dans des circuits fermés, et la circulation totale d'eau est généralement de plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/h.

D'importantes quantités d'eau sont également utilisées, dans la préparation des revêtements et pour le nettoyage dans les zones de formage et de bobinage, la consommation totale d'eau par tonne de produit fini est en moyenne de 4 à 20 m<sup>3</sup>, les fuites des systèmes de refroidissement représentant environ 20 % de ce chiffre.

## 3.5.2 Emissions atmosphériques

### 3.5.2.1 Matières premières

La plupart des installations modernes sont équipées de filtres, pour la réduction à des valeurs 5 inférieures à 5 mg/m<sup>3</sup>, les émissions massiques provenant à la fois des installations équipées de systèmes de filtrage et non équipées dépendront du nombre de transferts et de la quantité de matériaux manipulés. Le stockage et la manutention, des matériaux de revêtement, peuvent également provoquer l'émission de poussières et de composés organiques volatiles, COV. Mais elles sont généralement très faibles et peuvent être contrôlées, par l'application de bonnes pratiques et de systèmes d'aspiration appropriés.

### 3.5.2.2 Fusion

{tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE}

Dans le secteur de production des fibres de verre à fil continu, les principales émissions potentielles sont les émissions atmosphériques provenant de la fusion. Les principales substances émises et les sources correspondantes sont décrites au paragraphe 3.2.2.1. Les fours les plus utilisés, dans ce secteur, sont du type à récupération au gaz, avec possibilité de boosting électrique, certains fours sont au fioul.

Le Tableau 3.14 résume les valeurs des émissions atmosphériques. Les chiffres indiqués concernent à la fois des installations munies de systèmes de réduction primaire et secondaire. Les émissions de poussières sont principalement composées de sulfates d'alcalis et de borates, sulfate de sodium/potassium et borate de sodium /potassium.

	Méthodes de réduction primaire mg/m <sup>3</sup> [kg/tonne de verre fondu]	Méthodes de réduction secondaire mg/m <sup>3</sup> [kg/tonne de verre fondu]
Oxydes d'azote, NO <sub>2</sub>	670 à 1600 [0,5 à 8,0]	pas d'exemple de réduction secondaire
Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub>	150 à 1200 [0,75 à 6,0] , au gaz jusqu'à 3000 [15] , au fioul	pas d'exemple de réduction secondaire
Particules	200 à 500 [1,0 à 2,5]	5 à 50 [0,025 à 0,25]
Fluorures, HF	10 à 50 [0,05 à 0,25] pas de fluorure ajouté 50 à 400 [0,25 à 2,0] fluorure ajouté	<20 [<0,1]
Chlorures, HCl	<10 [<0,05]	<10 [<0,05]
Métaux	<5 [<0,025]	<5 [<0,025]

**Tableau 3.14 : Niveaux d'émissions relatives aux installations de production des fibres de verre à fil continu**

**Conditions de référence : milieu sec, température de 0°C, 273 K, pression 101,3 kPa, 8 % d'oxygène par volume.**

**Les émissions massiques les plus faibles de NOx concernent un four oxycombustion, et ne concernent donc pas le four qui présente les plus faibles concentrations.**

Les niveaux d'émission, pour un four donné, peuvent dépendre de divers facteurs, la composition, les techniques de réduction employées et l'ancienneté. Les émissions de fluorures sont directement liées à l'utilisation de composés à base de fluorures, dans la composition. Dans certains cas, le fluorure est ajouté en tant que matière première, pour compléter la composition du verre, tandis que dans d'autres, il se présente sous la forme d'impuretés des matières premières. Quelle qu'en soit l'origine, une partie du fluorure sera émise, à travers les gaz d'échappement du four. La concentration de fluorure peut varier, en fonction du niveau de contenu dans la composition, et des mesures de réduction adoptées. La quantité de fluorine, considérée comme nécessaire, dépendra d'un grand nombre de facteurs techniques, liés au four et à sa structure, au débit et au diamètre de fil requis, pour le produit fini.

### 3.5.2.3 Activités en aval

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Les émissions atmosphériques, dues aux opérations de revêtement, sont généralement assez faibles, en raison de la faible volatilité des matériaux de revêtement, et des basses températures du verre, au point d'application. Toutefois, la circulation d'air, dans la zone de formage, est élevée, afin d'assurer le refroidissement du verre et des gouttelettes, ainsi que de l'évaporation de composés organiques, peuvent se produire. Dans la plupart des cas, l'air de refroidissement aspiré est traité, par des systèmes de dépoussiérage humide, avant l'émission ou le recyclage partiel, dans la zone de formage. En raison de l'important volume d'air de refroidissement, les concentrations des émissions sont généralement assez faibles. Quelques mesures, y compris l'utilisation de revêtements avec grosses quantités de solvants, ont montré des concentrations de COV, allant de valeurs très faibles jusqu'à 20 mg/m<sup>3</sup>.

Les matières utilisées, pour le revêtement, sont généralement à base aqueuse et les blocs de fibres sont souvent séchés dans des fours. Le procédé de séchage peut provoquer des émissions de vapeur d'eau et de substances volatiles, aux températures de séchage. Les revêtements sont liés chimiquement au verre, pendant le procédé de séchage et les niveaux d'émission sont généralement peu importants. Toutefois, les formules des revêtements, et donc les émissions, peuvent beaucoup varier et peu de chiffres sont disponibles, pour ces dernières années. Selon les chiffres disponibles, les valeurs de COV varient entre des valeurs à peine mesurables et un maximum de 70 mg/m<sup>3</sup>. Ce qui correspond, dans cet exemple, à moins de 100 g/h.

Les émissions peuvent également être générées par des procédés secondaires, nécessaires à la fabrication de matelas et de tissus, comportant l'utilisation de liants, qui doivent être traités thermiquement ou séchés. Dans ce cas également peu de données sont disponibles et montrent d'importantes différences, selon les techniques et les substances utilisées. Les émissions maximales de COV constatées, sont comprises entre 150 mg/m<sup>3</sup> et 270 g/h.

### 3.5.3 Emissions aqueuses

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Ces émissions sont générées par le formage, la préparation des liants, le nettoyage, le refroidissement, l'application de liant aux tissus/matelas et les systèmes de dépoussiérage par voie humide. La principale source d'émission est la zone de formage. Etant donné la vitesse élevée des bobinoirs, force centrifuge, et le mouvement des fils, pendant le formage, une partie

du liant est propulsée à l'extérieur et écrasée. Ceci est collecté dans la zone environnante, avec l'eau utilisée, pour le nettoyage régulier de la zone de bobinage et de formage. L'eau vaporisée sur les fils est également collectée au même endroit.

Dans la zone de préparation des liants, les émissions peuvent être générées par des déversements accidentels et des fuites, qui s'écoulent dans le système d'évacuation des eaux. Les systèmes d'épuration, des gros volumes d'eau de refroidissement, nécessitent des courants de nettoyage, contenant des petites quantités de produits chimiques, pour le traitement des eaux. La plupart des systèmes d'épuration utilisés sont des systèmes par voie humide, nécessitant un courant d'épuration ou une évacuation périodique et le remplacement du dispositif d'épuration. La consommation totale d'eau, par tonne de produit fini, est en moyenne comprise entre 4 et 20 m<sup>3</sup>, les pertes du système de refroidissement, évacuation et évaporation, représentant environ 20 % de ce chiffre. A l'exception, bien entendu, des pertes par évaporation, la grande partie de cette eau est éliminée, en tant qu'eau usée. La pratique courante, dans le secteur, consiste à la décharger dans des usines de traitement des eaux usées, ou à la traiter sur le site.

Les concentrations de produits polluants, dans les eaux usées, sont généralement très faibles, moins de 0,2 %, de déchets solides avant le traitement, en raison de la dilution opérée par l'eau de lavage, et leur contenu est presque biodégradable. Les produits chimiques employés ne contiennent pas de métaux lourds, ni de substances classées dangereuses, mais la composition effective varie beaucoup d'une usine à l'autre, en raison de la variété des liants utilisés. Pour certains produits on utilise encore un agent d'accrochage, à base de chrome, mais cela devient de plus en plus rare.

### 3.5.4 Autres déchets

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

Dans l'atelier de composition, les déchets peuvent être générés par les compositions rejetées, ainsi que par des déversements et des fuites. La qualité des matières premières est essentielle pour le procédé et, généralement, ces déchets sont envoyés à la décharge, de 5 à 50 tonnes par an.

Le verre fondu, qui s'écoule du four dans les avant-creusets, peut contenir de petites quantités d'impuretés, particules non fondues, qui peuvent provoquer la rupture des fils dans les filières et des déchets de fibres de verre. Afin de minimiser ces ruptures, les filières de drainage peuvent être installées, au bout du canal qui alimente les avant-creusets, de façon à retenir une petite partie de verre, contenant ces parties plus denses non fondues. Lorsqu'on utilise des filières de drainage, le verre drainé représente environ 1 à 5 % du verre fondu. Le verre drainé est transformé en calcin et recyclé, dans le procédé ou bien utilisé pour d'autres applications. Le recyclage interne de ce matériau n'est pas toujours souhaitable. Car cela implique la réintroduction dans le four des impuretés qui ont été séparées et qui vont refluer vers les filières. Ceci peut amener à la formation progressive de matériau non fusible et d'une quantité plus importante de verre drainé.

Des déchets de verre et des fibres peuvent également être générés par le changement de produits d'emballage et par la rupture des fils, alors que le verre continue à couler, sans pouvoir être transformé en produit fini. La fabrication de fils de très petit diamètre, de 5µm à 25µm, comporte toujours un certain pourcentage de rupture, par conséquent, la quantité de déchets de fibres de verre peut être relativement élevée, et constitue généralement l'une des sources les plus importantes de déchets dans le procédé. La quantité de déchets peut être comprise entre 10 et 25 %, de la quantité totale de verre en fusion sortant du four, en fonction du type de formage et du diamètres des fils. Ces quantités peuvent augmenter de manière significative, en cas de problèmes liés aux matières premières, ou aux performances et à la stabilité du four. Les déchets de fibres contiennent jusqu'à 25 % d'eau et de liants dilués.

La transformation du bloc de fibres, en produit fini, provoque une certaine quantité de fibres, qui peut varier, selon les produits de 3 à 10 %. Le matériau inutilisable provient principalement des blocs, intérieur et extérieur, de la laine de laitier, du matériau endommagé ou rejeté, des échantillons, des ébarbures des matelas, etc. Généralement les déchets contiennent des matériaux de revêtement, dans une proportion comprise entre 0,5 et 10 %, jusqu'à 20 % pour les tissus et de l'eau jusqu'à 15 %.

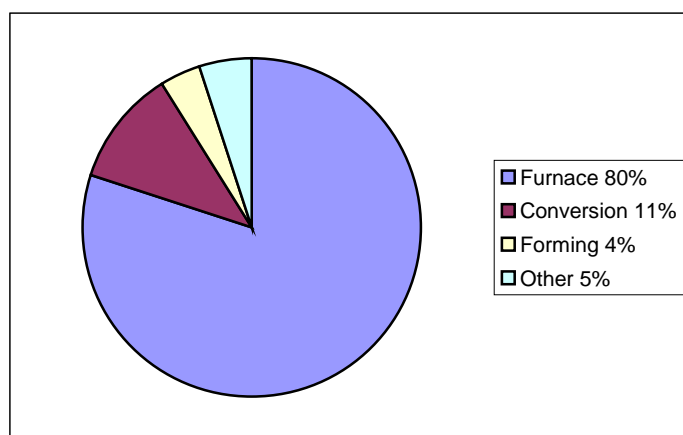
Les poussières, collectées dans les systèmes de réduction, peuvent être recyclées dans le four. Lorsque des techniques d'épuration à sec sont appliquées, le recyclage peut être plus complexe et comporter le mélange et la transformation.

### 3.5.5 Energie

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm14 ETSU]

la Schéma 3.3 ci-dessous montre la répartition de la consommation d'énergie, pour une installation moyenne de production de fibres de verre. La consommation d'énergie, dans des procédés spécifiques peut varier en fonction de la taille du four et du type de transformation en aval. Généralement, plus des trois quarts de l'énergie est absorbée par le procédé de fusion. Le formage, y compris le réchauffement des filières, et la transformation du produit représentent 15 %, tandis que l'énergie restante est employée pour les services généraux, les systèmes de contrôle, l'éclairage et le chauffage de l'usine.

La plupart des fours, employés dans ce secteur, sont du type à récupération au gaz, dont certains équipés de boosting électrique, jusqu'à 20 % de l'énergie de fusion. Il y a également des exemples de fours à combustibles fossiles, d'alimentation enrichie à l'oxygène et de fours oxycombustion. La température de préchauffage de l'air, des fours à récupération, est inférieure à celle des fours régénératifs, et les besoins en énergie sont donc plus élevés, par tonne de produit. Dans ce secteur, la conductivité électrique du verre est extrêmement faible, et, normalement, la fusion 100 % électrique n'est pas considérée viable, d'un point de vue technique et économique.



**Schéma 3.3 : Consommation d'énergie dans une installation moyenne de production de fibres de verre à fil continu**

La consommation d'énergie, utilisée dans le procédé de fabrication, dépend de nombreux facteurs, les principaux étant décrits au Paragraphe 3.2.3. La consommation d'énergie, absorbée par la fusion, est généralement comprise entre 11 et 23 GJ/tonne de verre fondu. Bien que pour



certaines fours, destinés à la fabrication de produits spéciaux, cela puisse atteindre 30 GJ/tonne, la consommation globale d'énergie est habituellement comprise entre 18 et 33 GJ/tonne de produit. Les températures maximales constatées, sur la voûte du four, dans les fours de production des fibres de verre, tournent autour de 1 650° C, ce qui dépasse de 50° C les températures employées, pour le verre d'emballage et de 250° C, celles constatées pour la production de laine minérale. Les températures de fusion plus élevées contribuent à la consommation d'énergie relativement élevée, constatée dans ce secteur.

### 3.6 Gobeletterie

[tm27 Domestique]

Comme indiqué aux Chapitres 1 et 2, le secteur de la gobeletterie est extrêmement diversifié, aussi bien en ce qui concerne les produits finis que les compositions du verre et les types de fours employés. Par conséquent, on constate une certaine différence, dans les apports utilisés, dans le procédé et dans les produits. Comme dans tous les autres secteurs, le principal produit du procédé de fabrication est le produit fini. Dans la production de verre sodocalcique, le produit représente entre 50 et 90 %, en moyenne 85 %, de l'apport de matières premières, tandis que pour le cristal au plomb 24%, ce chiffre est compris entre 35 % et 80 %, en moyenne 75 %. La valeur est inférieure pour le cristal au plomb 24%, en raison d'un certain nombre de facteurs, tels que des opérations de découpe et de polissage, plus importants et des contraintes plus sévères, en ce qui concerne la qualité. Les autres types de gobeletterie, cristal, opale, borosilicates et vitrocéramique, présentent des valeurs comprises entre ces deux extrêmes. Le Tableau 3.15 synthétise les principaux paramètres de consommation et de production, relatifs à la fabrication de verre sodocalcique et de cristal au plomb 24%. Encore une fois, les valeurs pour les autres types de verre, pour gobeletterie, sont comprises entre les valeurs données à titre d'exemple.

	unités/tonne de verre fondu	Verre sodocalcique plage de valeurs (valeurs moyennes)	Cristal au plomb 24% plage de valeurs (valeurs moyennes)
<b>Apports</b>			
Energie, fioul/gaz	GJ	5 à 14 (9)	0,5 à 5 (3)
Energie, électricité	GJ	1 à 4 (2,5)	1 à 6 (4)
Sable siliceux	tonne	0,65 à 0,75 (0,6)	0,20 à 0,50 (0,42)
Carbonates	tonne	0,3 à 0,42 (0,34)	0,08 à 0,20 (0,14)
Oxyde de plomb	tonne		0,08 à 0,21 (0,18)
Composants minéraux secondaires	tonne	0,02 à 0,08 (0,04)	0,005 à 0,02 (0,01)
Calcin recyclé	tonne	0,15 à 0,4 (0,25)	0,25 à 0,65 (0,35)
Matériaux d'emballage	tonne	0,06 à 0,20 (0,1)	0,06 à 0,20 (0,1)
Moules et autres	tonne	0,001 à 0,003 (0,002)	0,001 à 0,003 (0,002)
Eau	m <sup>3</sup>	4 à 9 (7)	3 à 70 (7,5)
Acide fluorhydrique ,100 %,	kg/t pol. à l'acide <sup>(1)</sup>		40 à 130 (65)
Acide sulfurique ,96 %,	t/t HF,100 %, <sup>(1)</sup>		1 à 10(5)
Hydroxyde de sodium	t/t HF,100 %, <sup>(1)</sup>		0 à 0,2(0,1)
Hydroxyde de Calcium	t/t HF,100 %, <sup>(1)</sup>		1 à 10(4)
Eau de lavage	t/t HF,100 %, <sup>(1)</sup>		0,025 à 0,07(0,05)
<b>produits</b>			
Produits finis et emballés	tonne	0,5 à 0,9 (0,85)	0,35 à 0,8 (0,75)
Emissions atmosphériques	kg		
CO <sub>2</sub>		150 à 1000 (700)	150 à 400 (300)
NO <sub>x</sub>		0,9 à 11 (4,8)	0,9 à 5(0,1)
SO <sub>x</sub>		0,1 à 2,8 (0,7)	0,1 à 1,0(0,2)
Poussières		0,001 à 0,8(0,4)	0,001 à 0,1(0,02)
H <sub>2</sub> O		60 à 500(300)	60 à 250(120)
Eaux usées	m <sup>3</sup>	3,6 à 9,1 (6,3)	2,7 à 70 (6,8)
Calcin recyclé	tonne	0,15 à 0,4 (0,25)	0,25 à 0,65 (0,35)
Déchets à recycler	kg	10 à 60 (30)	10 à 60 (30)

		Verre sodocalcique	Cristal au plomb 24%
	unités/tonne de verre fondu	plage de valeurs (valeurs moyennes)	plage de valeurs (valeurs moyennes)
Autres déchets	kg	6 à 50 (10)	6 à 50 (10)
déchets à recycler PbSO <sub>4</sub> O <sub>2</sub> PbCO <sub>3</sub> CaSO <sub>4</sub>	t/t HF, 100 %, <sup>(1)</sup> t/t HF, 100 %, <sup>(1)</sup>		0,2 à 1,5(0,8) 2 à 20(7,5)
Déchets à éliminer Chutes générées par la découpe Métaux lourds	t/t HF, 100 %, <sup>(1)</sup> t/t HF, 100 %, <sup>(1)</sup>		0,3 à 0,7(0,45) 0,1 à 0,5(0,3)

**Tableau 3.15 : Vue d'ensemble des apports et des produits du secteur de production de la gobeletterie**

**(1) En ce qui concerne le polissage à l'acide, 100 % d'acide fluorhydrique est le meilleur paramètre de référence. Car il prend en compte le rapport surface/volume. La consommation de 100 % HF/tonne de verre poli à l'acide, dépendra du rapport surface/volume et, par conséquent, du type d'articles à polir.**

### 3.6.1 Apports utilisés dans le procédé

Les apports nécessaires varient en fonction du produit à fabriquer et de la composition de verre nécessaire à sa fabrication. Les principaux types de verre employés sont le verre sodocalcique, le cristal au plomb 24%, le cristal, le verre au borosilicate, le verre opaque et la vitrocéramique. Les matières premières, principalement utilisées, dans ce secteur, figurent au Tableau 3.16 ci-dessous.

<b>Matières premières pour la formation du verre</b>	Sable siliceux calcin.
<b>Matières intermédiaires et agents modificateurs</b>	carbonate de sodium et de potassium, calcaire, dolomite, sulfate de sodium, alumine, syénite néphélinique, nitrate de sodium, nitrate de potassium, borax, arsenic, antimoine, carbone, oxyde de plomb, fluorine.
<b>Colorants et décolorants</b>	Oxydes de chrome, fer, cobalt, cuivre, manganèse, nickel, sélénium ou sélénite de zinc, cérium.
<b>Agents de revêtement</b>	Chlorures métalliques organiques et inorganiques. Principalement tétrachlorure d'étain, tétrachlorure de titane et chlorure d'étain monobutylique.
<b>Lubrifiants</b>	Lubrifiants à base de polyéthylène et acides gras, entre autres acide oléique.
<b>Combustibles</b>	Fioul, gaz naturel, électricité, butane, propane, acétylène.
<b>Eau</b>	Eau provenant du réseau d'adduction d'eau et de sources naturelle locales, puits, rivières, lacs, etc.
<b>Matériaux secondaires</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique, le papier, le carton et le bois Lubrifiants pour moules, généralement des agents de démoulage au graphite haute température Lubrifiants pour machines, généralement des huiles minérales. Gaz de fabrication, oxygène et hydrogène. Acides minéraux pour le polissage, HF, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , et NaOH. Matériaux de décoration, émaux et sable. produits chimiques pour le traitement de l'eau, de l'eau de refroidissement et des eaux usées

**Tableau 3.16 : Matières premières employées dans la fabrication de la gobeletterie**

Les matières premières, qui forment la composition, sont mélangées, dans les bonnes proportions, pour obtenir la formule de verre souhaitée. Pour le verre sodocalcique, les oxydes de silicium, sodium et calcium, constituent plus de 90 % du verre,  $\text{SiO}_2$  de 71 à 73 %,  $\text{Na}_2\text{O}$  de 12 à 14 % et  $\text{CaO}$  de 10 à 12 %. Le bioxyde de silicium est principalement contenu dans le calcin et dans le sable. L'oxyde de sodium est contenu dans le carbonate de sodium et l'oxyde de calcium dans le calcaire. Le cristal au plomb 24% est généralement composé de  $\text{SiO}_2$  de 54 à 65 %, de  $\text{PbO}$  de 25 à 30 %, de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou de  $\text{K}_2\text{O}$  de 13 à 15 %, ainsi que d'autres composants secondaires. Dans le cristal au plomb, l'oxyde de plomb est partiellement ou totalement remplacé par le baryum, le zinc ou les oxydes de potassium, dans des limites définies par la Directive 69/493/EEC.

Les verres au borosilicate contiennent du trioxyde de bore,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , et une forte proportion de bioxyde de silicium. La composition la plus courante est de 70 à 80 % de  $\text{SiO}_2$ , de 7 à 15 % de  $\text{B}_2\text{O}_3$ , de 4 à 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ , et de 2 à 7 % d'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Le trioxyde de bore est dérivé du borax et d'autres substances chargées en bore, tandis que l'oxyde d'aluminium est principalement extrait de l'alumine.

Les verres opaques sont principalement composés d'oxydes de silicium, de sodium, de calcium, d'aluminium et de potassium. Mais ils contiennent également environ 4 à 5 % de fluorure, dérivé de minéraux tels que la fluorine. Les principaux oxydes, dans la vitrocéramique sont, celui d'aluminium, de sodium et de calcium, avec de plus faibles quantités de magnésium, baryum, zinc, zirconium, lithium et titane. L'utilisation du calcin, dans ce secteur, varie en fonction des procédés employés. Le calcin du procédé est recyclé en interne, tandis que le calcin extérieur est habituellement rejeté, à cause du niveau de qualité requise.

Dans le secteur de la gobeletterie, on utilise différents types d'agents affinants, tels que des nitrates, des sulfates et, dans certains cas spécifiques, des composés de l'arsenic et de l'antimoine, de 0,1 à 1 % et du Sb de 0,1 à 0,4 %. Le sélénium est également utilisé en tant qu'agent décolorant, dans une proportion moyenne de < 1 %, de la composition, dans la production du cristal au plomb 24%. Il est généralement nécessaire de polir le verre, après l'avoir découpé, le plus souvent en le trempant dans un mélange fort, d'acide fluorhydrique et sulfurique, et en le rinçant ensuite à l'eau claire. Certains produits reçoivent un traitement de surface, similaire à ceux appliqués dans le secteur du verre d'emballage, et décrits au Paragraphe 3.3.

Les combustibles employés varient d'un procédé à l'autre. Mais généralement, pour la fusion du verre, on utilise le gaz naturel, le fioul et l'électricité, séparément ou ensemble. Les avant-creusets et les galeries de recuit, sont chauffés au gaz ou à l'électricité, qui sont également utilisés pour le chauffage des locaux et les services généraux. Le fioul domestique, le propane et le butane sont également employés parfois comme combustibles d'appoint, ainsi que pour le traitement de surface, comme l'acétylène.

Dans le secteur de la gobeletterie, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement et le nettoyage. L'eau de refroidissement est utilisée, dans des circuits ouverts ou fermés, pour refroidir différents équipements. Ce qui provoque des pertes, par évaporation ou par fuite. L'eau est également utilisée dans des opérations spécifiques en aval, découpe, polissage, lavage, etc., ainsi que pour le dépoussiérage, par voie humide. Par conséquent, la consommation réelle d'eau peut varier, en fonction des conditions locales, par exemple la température ambiante et la dureté de l'eau.

### 3.6.2 Emissions atmosphériques

[tm27 Domestique]

### 3.6.2.1 Matières premières

Dans la plupart des installations de production du verre pour gobeletterie, les silos et les réservoirs à agitation sont équipés de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières, en dessous de  $5 \text{ mg/m}^3$ . Les émissions massiques, provenant à la fois des installations équipées de systèmes de filtrage et non équipées de systèmes de filtrage, dépendent du nombre de transferts et de la quantité de matières premières manipulées. Toutefois, l'une des caractéristiques de ce secteur est que certains ateliers de composition sont relativement petits et de nature spécifique et les volumes de production limités de certains articles requièrent davantage de manutention manuelle, semi-automatique et des transferts. Les émissions, générées par ces opérations, dépendent de la façon dont les systèmes sont contrôlés, un sujet qui sera traité au Chapitre 4. Naturellement, la manutention de matières plus toxiques, telles que l'oxyde de plomb, l'arsenic, etc., provoque un risque d'émission de ces substances. Généralement, on met en place des systèmes de contrôle spécifiques, pour prévenir ce type d'émission, par exemple l'aspiration des poussières et la manutention pneumatique, ce qui minimise le niveau des émissions.

### 3.6.2.2 Fusion

[tm27 Domestique]

Dans le secteur de production du verre pour gobeletterie, les émissions les plus courantes, sont les émissions atmosphériques provenant de la fusion. Les principales substances émises et les sources correspondantes, sont décrites au paragraphe 3.2.2.1. Ce secteur est très diversifié, en termes de produits, et on y trouve la plupart des techniques de fusion, décrites au Chapitre 2. Les combustibles utilisés sont généralement le gaz naturel, le fioul et l'électricité. Une synthèse des valeurs des émissions atmosphériques figure au Tableau 3.17 ci-dessous. Ces données concernent les émissions des fours de production de verre sodocalcique et de cristal au plomb 24%. Ces chiffres, dans leur ensemble, sont considérés comme représentatifs de tout le secteur, les émissions relatives aux autres types de verre, rentrant dans ces exemples.

Substance	verre sodocalcique (chiffre moyen)		cristal au plomb 24% (chiffre moyen)	
	$\text{mg/Nm}^3$	kg/tonne de fusion	$\text{mg/Nm}^3^{(1)}$	kg/tonne de fusion
Oxydes d'azote, $\text{NO}_2$	140 à 5500 <sup>(2)</sup> (2300)	0,9 à 11 (4,8)	1000 à 2000 (1500)	0,9 à 5,0 (1)
Oxydes de soufre, $\text{SO}_2$	50 à 1000 (250)	0,1 à 2,8 (0,7)		0,1 à 1 (0,2)
Particules	0,5 à 400 (200)	0,001 à 0,8 (0,4)	2 à 10 (5)	0,001 à 0,1 (0,02)
Fluorures HF	<5		0,1 à 1,0 (0,5)	0,0002 à 0,004 (0,0003)
Chlorures HCl	<10		0,5 à 5,0 (2,0)	0,001 à 0,003 (0,002)
Métaux, plomb compris	<5		0,05 à 0,5 (0,2)	0,0001 à 0,035 (0,01)

**Tableau 3.17 : Synthèse des émissions atmosphériques générées par les différents types de fondoirs à verre**

<sup>(1)</sup> ces données se réfèrent à des fours traditionnels, c'est à dire non électriques

<sup>(2)</sup> certaines valeurs plus élevées correspondent à l'utilisation de nitrates dans la composition ou à d'autres conditions spécifiques, par exemple des tirées de filière peu élevées

Les niveaux d'émissions, pour certains fours, peuvent dépendre de nombreux facteurs, y compris la composition, les techniques de réduction employées et l'ancienneté du four. Les émissions de fluorures sont directement liées à l'utilisation de composés à base de fluorures,

dans la composition. Dans certains cas, le fluorure est ajouté en tant que matière première, pour compléter la composition du verre, tandis que dans d'autres, il se présente sous la forme d'impuretés. Quelle qu'en soit l'origine, une partie du fluorure sera émise, à travers les gaz d'échappement du four. La fluorine est généralement émise sous la forme de HF, tandis que les métaux peuvent être émis sous forme de fumées, ou bien, plus fréquemment, contenus dans les particules.

### 3.6.2.3 Activités en aval

Le verre sodocalcique peut recevoir un traitement de surface. Les traitements et les émissions, associés à ceux-ci, sont similaires à ceux décrits pour le verre d'emballage, au Paragraphe 3.3.2. De nombreux produits sont finis au feu, ce qui ne provoque aucune émission, en dehors des fumées des flammes, produites par les combustibles. Le polissage à l'acide du cristal au plomb 24%, peut générer des émissions et des fumées, HF et SiF<sub>4</sub>, qui sont généralement traitées dans des tours de lavage, avec de l'eau ou une solution alcaline, par exemple hydroxyde de sodium. Les émissions, provenant de ce procédé, sont généralement peu importantes, après le lavage. Les opérations de broyage et de découpe provoquent des émissions de poussières, qui sont généralement contrôlées, en découpant en milieu liquide ou par l'aspiration de l'air ambiant.

### 3.6.3 Emissions aqueuses

[tm27 Domestique]

Tout comme dans les autres secteurs de l'industrie du verre, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement et le nettoyage, et les émissions aqueuses se limitent à l'épuration du circuit des eaux de refroidissement, aux eaux de nettoyage et à l'écoulement des eaux de surface. Les eaux de nettoyage ne présentent pas, en général, de problèmes particuliers, en dehors de ceux qui sont communs à toute installation industrielle, à savoir les solides inertes et les huiles. Les eaux usées, provenant des systèmes de refroidissement, contiennent généralement des sels dissous et des produits chimiques, pour le traitement de l'eau. La qualité de l'eau de surface dépendra du niveau de séparation du réseau de drainage et de la propreté du site.

Toutefois, la fabrication de certains produits, notamment les verres chargés en plomb, peuvent donner lieu à des émissions directes, pouvant contenir du plomb ou d'autres composés. Les principales sources potentielles d'émissions aqueuses sont les eaux de nettoyage, des zones dans lesquelles les matières premières qui forment la composition ont pu être déversées, pouvant contenir du plomb, de l'arsenic, de l'antimoine, etc., ainsi que l'eau utilisée dans les opérations de découpe et de broyage des produits. La plupart des procédés ont des techniques d'élimination des particules solides, à savoir le tassement, la précipitation, la floculation, afin de se conformer aux normes locales en vigueur, des niveaux de plomb inférieurs à 1 mg/l sont courants.

Le polissage à l'acide provoque également des émissions aqueuses. Après avoir été trempé dans l'acide, le verre est recouvert d'une couche de sulfate de plomb et de hexafluorosilicates qu'on élimine ensuite à l'eau chaude, qui deviendra donc acide, et contiendra du sulfate de plomb. En fonction des produits chimiques utilisés, pour neutraliser cette eau, le sulfate de plomb pourra réagir plus tard, par exemple pour former du CaSO<sub>4</sub> avec du Ca OH<sub>2</sub>, en modifiant la structure du plomb.

Le procédé de polissage provoque également une certaine dissolution du verre, qui est en partie précipité du bain acide, en tant que mélange de sels, qui après séparation, provoque une "boue décapante". Cette boue est traitée par filtrage et lavage, afin d'en extraire le sulfate de plomb, ou bien en la faisant réagir avec du carbonate de calcium ou de sodium, afin d'obtenir du carbonate de plomb. Ces deux produits peuvent être employés en tant que matières premières, et réintroduits dans la composition, ou bien récupérés. La partie liquide, générée par le traitement des boues décapantes, donne une solution acide qui peut être réutilisée, dans le bain de polissage.

Le fumées du bain acide réagissent avec l'eau, en formant de l'acide hexafluorosilicique,  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , à des concentrations pouvant atteindre 35 %. Cette eau acide doit être neutralisée, avant d'être évacuée. Parfois l'acide peut être récupéré et vendu aux industries chimiques.

### 3.6.4 Autres déchets

La majorité des déchets de verre, calcin, sont recyclés dans le four et les niveaux de déchets sont généralement peu importants. Les déchets en général provenant des emballages et des réparations sont analogues à ceux des autres secteurs. Les poussières, collectées par les systèmes prévus à cet effet et par les dispositifs de dépoussiérage à sec, sont généralement recyclées dans le four. Dans la production du cristal au plomb 24%, les boues, collectées dans le circuit d'épuration des eaux, doivent être éliminées, si elles ne peuvent pas être réutilisées. la formation de la boue est traitée paragraphe 3.6.3 ci-dessus et les chiffres correspondants figurent au Tableau 3.15.

### 3.6.5 Energie

[tm14 ETSU]

Il est relativement difficile d'évaluer la consommation d'énergie, dans ce secteur, en raison de sa diversité et du grand nombre de techniques employées. La production de gros volumes de vaisselle, en verre sodocalcique, a beaucoup de points communs avec la production de verre d'emballage, cf. paragraphe 3.3.5, et présente une répartition de la consommation d'énergie comparable à celle-ci. Toutefois, une quantité plus élevée d'énergie est nécessaire dans les opérations en aval, entre autres le polissage et la finition au feu. La consommation d'énergie, absorbée par la fusion du verre, est plus élevée ici que dans les autres secteurs de production du verre. Ceci en raison du fait que les fours sont généralement plus petits, que les températures de fusion sont légèrement plus élevées et que le séjour dans le four peut être jusqu'à 50 % plus long.

D'autres types de fabrication, notamment la production de cristal au plomb 24%, sont réalisés à une plus petite échelle et des fours à pots sont également utilisés. La répartition de la consommation d'énergie, pour la fabrication de cristal au plomb 24% de première qualité, dans des fours à pots, est illustrée par la Schéma 3.4 ci-dessous. Elle n'est pas représentative de l'ensemble du secteur.

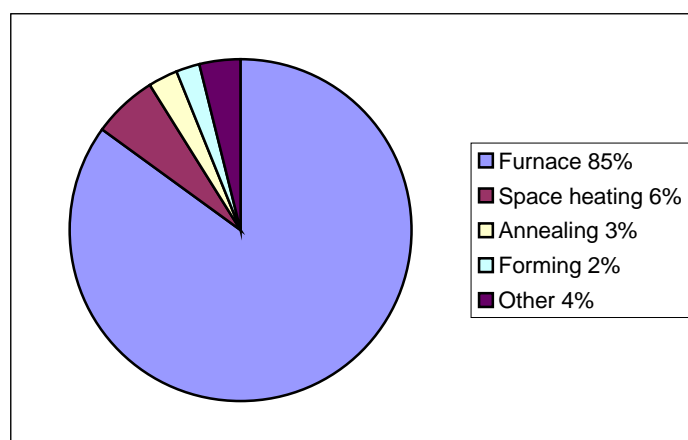


Schéma 3.4 : Consommation d'énergie dans la production de cristal au plomb 24%, fours à pots



La consommation globale d'énergie, dans la fabrication de cristal au plomb 24%, peut atteindre 60 GJ/ tonne de produit fini, alors que la quantité d'énergie nécessaire n'est que de 2,5 GJ/tonne environ. Cette différence peut être due à plusieurs facteurs, dont les principaux sont :

- des contraintes sévères, en matière de qualité, peuvent provoquer un taux élevé de mise au rebut. Le pot fond progressivement à l'intérieur du verre, formant des cordons et des "cailloux" dans le produit.
- Le verre est souvent travaillé main et le rendement, en ce qui concerne le formage, peut être inférieur à 50 %. Les articles doivent être réchauffés pendant le formage.
- Les pots doivent être "fondus" ou chauffés, à des températures élevées, et présentent des durées de vie limitées, par rapport aux fours en continu.

La fusion électrique, du cristal au plomb 24%, utilise des réfractaires de très haute qualité, qui donnent un verre de meilleure qualité et, par conséquent, moins de rejets et un rendement supérieur. La fusion électrique étant continue, le formage automatisé est plus efficace. Ces facteurs peuvent amener à une consommation d'énergie proche du chiffre de 25 GJ/tonne de produit. Les autres techniques de fusion en continu ou semi-continu peuvent également contribuer à augmenter le rendement thermique.

### 3.7 Verres spéciaux

Le secteur de production des verres spéciaux est extrêmement diversifié, aussi bien en termes de produits finis, qu'en termes de compositions et de procédés. Nombreuses sont les installations qui ne satisfont pas le critère de 20 tonnes/jour, établi par la Directive 96/61/EC, sauf lorsque la production de verres spéciaux est associée à d'autres types de production. Il n'est donc pas pratique et pas forcément nécessaire de tenter de résumer les différentes valeurs des émissions, pour l'ensemble du secteur. Toutefois, plus de 70 % de la capacité du secteur est consacrée à la fabrication de verre pour téléviseurs et de silicate de sodium. Nous avons essayé, autant que possible, dans ce paragraphe, de couvrir tout le secteur. Mais les données quantitatives sont disponibles uniquement pour le verre pour téléviseurs et pour le silicate de sodium.

#### 3.7.1 Apports utilisés dans le procédé

[tm25 Spécial]

La composition chimique du verre varie en fonction du type de verre et de son utilisation finale. elle est généralement exprimée en faisant référence aux oxydes des éléments qu'elle contient. Il n'est pas aisé d'identifier des compositions "typiques", pour un secteur aussi diversifié. Les matières premières de base sont préalablement sélectionnées et mélangées pour obtenir les différents types de verre souhaités, après la fusion. Les types de verre, et les compositions correspondantes, sont traités au Chapitre 2. Le Tableau 3.18 ci-dessous indique les principales matières premières utilisées, pour obtenir ces compositions.

Des données plus détaillées sont fournies pour les matières et les consommations relatives au silicate de sodium et au verre pour téléviseurs au Tableau 3.19, Tableau 3.20 et Tableau 3.21. Ces données concernent trois exemples de procédés spécifiques.

<b>Matières premières pour la composition du verre</b>	Sable siliceux, calcin recyclé du procédé de fabrication,
<b>Matières intermédiaires et agents modificateurs</b>	Carbonate de sodium, carbonate de potassium, lactaire, dolomite, sulfate de sodium, alumine, nitrate de sodium, nitrate de potassium, borax, acide borique, pur pour certaines applications, arsenic, As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , antimoine, Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , carbone, oxyde de plomb, carbonate de strontium, fluorine, syénite néphélinique, feldspaths, chlorure de sodium
<b>Colorants</b>	Chromate de fer, oxyde de fer, oxyde de cobalt, sélénium ou sélénite au zinc, cérium

<b>Combustibles</b>	Fioul, gaz naturel, électricité, butane, propane, acétylène
<b>Eau</b>	Eau provenant du réseau public d'adduction d'eau et de sources naturelles locales, puits, rivières, lacs, etc.
<b>Matériaux auxiliaires</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique, le papier, le carton et le bois Lubrifiants pour moules, généralement des agents de démoulage au graphite haute température Lubrifiants pour machines, généralement des huiles minérales Gaz de fabrication, azote oxygène, hydrogène et dioxyde de soufre, Produits chimiques pour le traitement des eaux de refroidissement et des eaux usées

Tableau 3.18 : Matières premières utilisées dans le secteur des verres spéciaux

APPORTS / tonne de silicate de sodium		PRODUITS	
<b>Matières premières</b>		<b>Produits silicate de sodium</b>	1000 kg
Sable , sec	772,1 kg	<b>Emissions atmosphériques</b>	
Carbonate de sodium	399,6 kg	Fluorures , HF	0,4 g
<b>Matériaux auxiliaires</b>		Dioxyde de carbone	540 kg
Eau , production de vapeur	7,3 kg	Monoxyde de carbone	0,258 kg
Produits pour le traitement des eaux	0,1 kg	Chlorures , HCl	0,024 kg
<b>Consommation d'eau</b>		Oxydes de soufre , SO <sub>2</sub>	1,322 kg
Eau de procédé	0,28 m <sup>3</sup>	Poussières	0,212 kg
Eau de refroidissement	0,94 m <sup>3</sup>	Oxydes d'azote , NO <sub>2</sub>	2,028 kg
Eau de nettoyage	0,18 m <sup>3</sup>	<b>Eaux usées</b>	0,28 m <sup>3</sup>
eau recyclée	68 kg	BOD	0,17 g
<b>Energie*</b>		COD	0,003 g
Total	6053 MJ	Solides en suspension	4,2 g
Récupérée	708 MJ	<b>Déchets solides</b>	0,65 kg
Consommation	5344 MJ		

Tableau 3.19 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour un procédé typique de fabrication de silicate de sodium [tm28 EMPA]

(\*L'installation était équipée d'une chaudière à récupération)

APPORTS / tonne de verre fondu		PRODUITS / tonne de verre fondu	
<b>Matières premières</b>		<b>Produit tubes cathodiques</b>	1000 kg
Sable	327 kg	<b>Emissions atmosphériques</b>	
Carbonate de sodium	53 kg	Poussières	6,1 g
Calcaire	35 kg	Oxydes d'azote, NO <sub>2</sub>	12000 g
Dolomite	18 kg	Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub>	71,4 g
Feldspath	35 kg	Plomb	1,4 g
Oxyde de plomb	140 kg	Autres métaux	0,14 g
Carbonate de potassium	70 kg	Chlorure, HCl	9,24 g
Nitrate de sodium. Ba.Sb.Zr composés	47 kg	Fluorure , HF	1,37 g
Calcin recyclé	20 %	Autres	
Autres déchets, poussières filtrées etc.	20 %	<b>Eaux usées</b>	
<b>Matériaux auxiliaires</b>		BOD	20,9 g
Eau de refroidissement, cf. eau du procédé		COD	107,4 g
Eau de procédé	3,6 m <sup>3</sup>	AOX	0,2 g
Produits chimiques pour le traitement des eaux	0,43 kg	<b>Déchets solides</b>	
Lubrifiants, polissage, broyage	0,33 kg	Total	15,5 g

<b>Energie</b>		dont métaux lourds	2,7 g
Electricité	893 MJ		
Gaz naturel	268 m <sup>3</sup>		
Gaz techniques	1,4 m <sup>3</sup>		

**Tableau 3.20 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour une installation moyenne de production de verre pour tubes cathodiques**

APPORTS / tonne de verre fondu		PRODUITS / tonne de verre fondu	
<b>Matières premières</b>		<b>Produit écrans de téléviseurs</b>	1000 kg
Sable	271 kg	<b>Emissions atmosphériques</b>	
Carbonate de sodium	50 kg	Poussières	32,6 g
Carbonate de baryum	63,8 kg	Oxydes d'azote, NO <sub>2</sub>	2700 g
Dolomite	11,7 kg	Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub>	81,7 g
Feldspath	58,5 kg	Antimoine	3,3 g
Carbonate de strontium	65 kg	Autres métaux	-
Carbonate de potassium	46 kg	Chlorure, HCl	2,6 g
Nitrate de sodium, Ti. Co. Sb. Zr. Ni. Zn. Ce, composés	50 kg	Fluorure, HF	1,3 g
Calcin	50 %	Autres, par exemple NH <sub>3</sub> , SCR	100 g
Autres déchets, poussières filtrées etc.	%	<b>Eaux usées</b>	
<b>Matériaux auxiliaires</b>		BOD	10,6 g
Eau de procédé y compris refroidissement d'appoint	1,82 m <sup>3</sup>	COD	54,7 g
Produits chimiques pour le traitement de l'eau	0,33 kg	AOX	0,11 g
Lubrifiants, polissage, broyage	0,21 kg	<b>Déchets solides</b>	
Agent refroidissant	2,64 kg	Total	7,9 g
<b>Energie</b>		dont métaux lourds	1,4 g
Electricité	892 MJ		
Gaz naturel	174 m <sup>3</sup>		
Fioul peu chargé en soufre	46,8 l		
Gaz techniques NH <sub>3</sub> , SCR	2,0 kg		
O <sub>2</sub>	1,5 m <sup>3</sup>		

**Tableau 3.21 : Vue d'ensemble de la consommation et de la production pour une installation de production de verre pour écrans de téléviseurs, équipée de système de réduction du Nox SCR**

## 3.7.2 Emissions atmosphériques

### 3.7.2.1 Matières premières

Dans la plupart des procédés de production de verres spéciaux, les silos et les réservoirs à agitation, sont équipés de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières, en dessous de 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques, provenant à la fois des installations équipées et non équipées de systèmes de filtrage, dépendent du nombre de transferts et de la quantité de matières premières manipulées. Toutefois, l'une des caractéristiques de ce secteur est que certains ateliers de composition sont relativement petits et que la nature spécifique et les volumes de production, limités de certains articles, requièrent davantage de manutention manuelle, semi-automatique et des transferts. Les émissions, générées par ces opérations, dépendent de la façon dont les systèmes sont contrôlés. Naturellement, la manutention de matières plus toxiques, telles que l'oxyde de plomb, l'arsenic, etc., crée un risque d'émission de ces substances.

### 3.7.2.2 Fusion

Dans le secteur de production de verres spéciaux, les principales émissions sont les émissions atmosphériques, générées par les activités de fusion. Les substances émises et les sources correspondantes, sont décrites au Paragraphe 3.2.2.1. La variété et la nature spécifique des produits de ce secteur amènent à utiliser un choix de matières premières plus vaste que dans d'autres. Entre autres, le verre pour tubes cathodiques a une teneur en plomb de 20 %, comparable au cristal au plomb 24%. Certaines compositions de verre peuvent impliquer l'utilisation d'agents affinants spéciaux, tels que les oxydes d'arsenic et d'antimoine, tandis que certains verres, pour l'industrie optique, peuvent contenir jusqu'à 35 % de fluorure et 10 % d'oxyde d'arsenic. Les émissions de fluorures, de plomb, d'arsenic et d'autres métaux, sont directement liées à l'emploi, dans la composition de base, de composés contenant ce type de substances.

Etant donné la nature très diversifiée du secteur, la plupart des techniques de fusion, décrites au Chapitre 2, sont utilisées. Toutefois, les volumes de production étant relativement faibles, les dimensions des fours sont assez limitées. Les techniques les plus courantes sont les fours à récupération, les fours à oxycombustion, les fondoirs à verre électriques et les réservoirs journaliers. Dans certains cas, des fours régénératifs sont également utilisés, par exemple pour la fabrication du verre pour tubes cathodiques et celle de silicate de sodium. Les températures de fusion des verres spéciaux sont parfois plus élevées que celles d'autres compositions plus courantes, produites en série. En particulier, le verre pour tubes cathodiques, le verre au borosilicate et la vitrocéramique qui nécessitent des températures de fusion de plus de 1 650 °C.

Ces températures élevées et ces formules complexes peuvent provoquer des émissions plus importantes, par tonne, que celles par exemple du verre sodocalcique. Les températures plus élevées favorisent une plus grande volatilisation et la formation de Nox, alors que l'emploi plus fréquent d'agents affinants, aux nitrates peuvent générer des rejets de NOx. SO<sub>2</sub> et des métaux. Les faibles volumes de production, associés à des températures plus élevées, comportent également, en général, un rendement thermique moins performant.

La fusion du silicate de sodium est généralement plus traditionnelle que celle d'autres types de verres spéciaux. Les matières premières de base sont le sable et le carbonate de sodium et, par conséquent, les émissions se limitent à des rejets de Nox, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et de poussières. Le secteur de production des verres spéciaux recoupe d'autres secteurs, en particulier celui du verre au borosilicate et de la vitrocéramique. Les émissions générées par ces fours sont comparables à celles qu'on rencontre dans la production de verre pour gobeletterie.

Les niveaux d'émission, pour un four donné, peuvent dépendre de multiples facteurs et, notamment, de la composition, du type de four, des techniques de réduction utilisées, du fonctionnement du four et de son ancienneté. Les niveaux d'émission, kg/ tonne produit, sont fournis dans les tableaux ci-dessus, pour trois types différents de production. Des exemples d'émission, à la fois sous forme de masse et de concentration, sont fournis dans l'Annexe 1.

### 3.7.2.3 Activités en aval

Les émissions, générées par les opérations en aval du four, sont extrêmement spécifiques et doivent être analysées séparément, pour chaque site. Toutefois, certains problèmes sont communs aux différents procédés.

Le silicate de sodium est dissout à haute température et à haute pression, pour obtenir une solution de silicate de sodium. Ce procédé ne présente pas de risques majeurs d'émissions atmosphériques. Alors que la manutention des matières premières et la transformation peuvent provoquer l'émission de poussières.

La production de verre pour téléviseurs comporte généralement des opérations de broyage et de polissage, pouvant générer des émissions de poussières, le verre pour tubes cathodiques contient 20 % de PbO. Ces opérations sont généralement réalisées par voie humide ou comportent la mise en place de systèmes de filtrage et d'aspiration. C'est la raison pour laquelle les niveaux d'émission sont généralement assez faibles. Certains procédés de production de verres spéciaux sont équipés de systèmes de réduction secondaires de NOx, SCR et SNCR, pouvant produire des rejets d'ammoniac.

Différents types de produits peuvent nécessiter des opérations de découpe, de broyage et de polissage, pouvant toutes provoquer des émissions de poussières. Chacune de ces opérations doit être évaluée séparément.

### 3.7.3 Emissions aqueuses

Tout comme dans d'autres secteurs de l'industrie du verre, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement et le nettoyage, les émissions aqueuses contiendront donc le produit de l'épuration des systèmes de refroidissement, des eaux de nettoyage et de l'écoulement des eaux de surface. Généralement, les problèmes posés par l'évacuation des eaux de nettoyage sont les mêmes que pour les autres secteurs de l'industrie, à savoir les solides inertes et l'huile. Les eaux usées, provenant des systèmes de refroidissement, contiennent généralement des sels dissous et des produits chimiques, pour le traitement de l'eau. La qualité de l'eau de surface dépendra du niveau de séparation du réseau de drainage et de la propreté du site.

Toutefois, le secteur étant extrêmement diversifié, il est difficile de prendre en compte toutes les émissions possibles et chaque cas doit être analysé séparément. On doit essentiellement prendre en compte les matières premières utilisées, pour chaque produit et le traitement auquel elles sont soumises. Toutes les matières premières potentiellement dangereuses, employées sur le site de production, peuvent entrer dans le flux des eaux usées, en particulier lorsque le procédé comporte la manutention des matières et la découpe et le broyage des produits finis. Entre autres, le broyage et le polissage du verre, pour écrans et tubes cathodiques, créent un flux aqueux, contenant des adjuvants de broyage et de polissage, ainsi que de fines particules de verre, pouvant contenir, par exemple du plomb. Généralement, les résidus solides sont éliminés et les résidus liquides sont recyclés, autant que possible. Toutefois, cela comporte un risque potentiel de déversement accidentel et d'évacuation. Des données quantitatives sont fournies dans les tableaux ci-dessus, pour trois types de procédés différents.

### 3.7.4 Autres déchets

Généralement une grande partie du calcin, généré par le procédé de production, est recyclé dans le four et la quantité de déchets solides est, de ce fait assez faible. Les déchets, produits par des opérations non spécifiques, telles que l'emballage et la réparation des fours, sont communs aux autres secteurs. Les poussières, collectées par les systèmes prévus à cet effet, et par les dispositifs de dépoussiérage à sec, sont généralement recyclées, dans le four. Dans les procédés comportant le broyage et le polissage des produits, les boues collectées dans le circuit d'épuration des eaux, doivent être éliminées, si elles ne peuvent pas être réutilisées. Des données quantitatives sont fournies dans les tableaux ci-dessus, pour trois types de procédés différents.

### 3.7.5 Energie

Il n'est pas facile de fournir des données générales, sur la consommation d'énergie, pour un secteur aussi diversifié. Les tableaux relatifs aux trois exemples de procédés donnent une indication de la consommation d'énergie, pour ces exemples spécifiques. Mais elle peut varier beaucoup, en fonction des techniques utilisées, de la composition et de la structure/du

fonctionnement de l'installation. Le rapport hollandais sur les MTD dans l'industrie du verre cite un chiffre de 12 à 15 GJ/tonne de produit fini [tm29 Infomil].

Les remarques d'ordre général, indiquées au paragraphe 3.2.3, s'appliquent à ce secteur, par ailleurs d'autres informations, sur les techniques de réduction de la consommation d'énergie, figurent au Chapitre 4. Parmi les considérations, spécifiques à la production de verres spéciaux, figure que les températures de fusion, pour ce type de produits, sont généralement plus élevées que celles appliquées pour les produits traditionnels, fabriqués en série, et que les fondoirs à verre des verres spéciaux, sont généralement de plus petites dimensions que ceux utilisés dans d'autres secteurs de l'industrie du verre. Ces deux facteurs sont à l'origine d'émissions plus importantes de CO<sub>2</sub> et d'une consommation d'énergie spécifique plus élevée.

### 3.8 Laine minérale

Les données présentées dans ce paragraphe concernent des installations de dimensions différentes, ayant des types de production différents, à l'exclusion, toutefois, des créations et des cessations d'activité. Les valeurs d'émission les plus faibles concernent parfois une seule installation qui est la seule à être en mesure d'obtenir ces résultats, grâce à des conditions locales particulières et les résultats ne sont donc pas indicatifs des MTD du secteur.

Le principal produit est le produit fini, qui peut représenter entre 55 % et 85 % de l'apport de matières premières, pour la production de la laine de roche, et entre 75 % et 95 %, pour la production de la laine de verre. Un facteur important c'est le recyclage des résidus du procédé de fabrication, qui augmente de manière significative le rendement de l'utilisation des matières premières. Les pertes sont constituées de résidus solides, d'émissions aqueuses et d'émissions atmosphériques.

#### 3.8.1 Apports utilisés dans le procédé

La composition chimique, de la laine de verre, peut varier considérablement. Généralement, elle est exprimée en fonction des oxydes, produits par les éléments qu'elle contient. Il n'est pas simple d'identifier une composition "typique", pour chacun des principaux types de laine minérale, à savoir la laine de verre, la laine de roche, de pierre, ou la laine de laitier. Les matières premières de base sont préalablement sélectionnées et mélangées, pour obtenir les différents types de verre souhaités, après la fusion. Le pourcentage de chaque matière première, dans la composition, peut varier de manière considérable, surtout en présence d'importantes quantités de matières recyclées.

Les compositions caractéristiques de la laine de verre, de la laine de roche et de la laine de laitier, figurent au Chapitre 2, Tableau 3.24. Le tableau ci-dessous indiquant les différentes matières premières, pouvant être employées, pour obtenir ce type de composition.

<b>laine de verre</b>	Sable siliceux, calcin recyclé, calcin d'origine extérieure, déchets de fabrication, syénite néphélinique, carbonate de sodium, carbonate de potassium, calcaire, dolomite, sulfate de sodium, borax, colémanite.
<b>Laine de roche/laine de laitier :</b>	Basalte, calcaire, dolomite, scories du four, sable siliceux, sulfate de sodium, déchets de fabrication, parfois déchets d'autres types de fabrication, par exemple, sable de fonderie,
<b>Liants</b>	Résine phénolique, solution, phénol, formaldéhyde et catalyseur de résine si elle est produite sur le site, ammoniacque, urée, huile minérale, silicium, silane, eau
<b>Combustibles :</b>	Gaz naturel, électricité, charbon, laine de roche/laine de laitier uniquement, combustibles d'appoint, fioul à usage domestique, propane, butane.



<b>Eau :</b>	Réseau public et sources naturelles locales, puits, rivières, lacs, etc.
<b>Matériaux auxiliaires :</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique, le papier, le carton et le bois Lubrifiants pour machines, généralement des huiles minérales Gaz de fabrication, oxygène et azote produits chimiques de traitement des eaux de refroidissement et des eaux usées

**Tableau 3.22 : Matières premières utilisées dans le secteur de production de la laine minérale**

Dans la laine minérale, les principaux oxydes sont l'oxyde de silicium, les oxydes de métaux alcalins, surtout le sodium et le potassium, et les oxydes de métaux de terre alcaline, en particulier le calcium et le magnésium. Les principales sources de dioxyde de silicium sont le sable et les déchets de verre, dont le calcin et les déchets fibreux. Les sources d'oxydes de métaux alcalins et de métaux de terre alcaline sont le carbonate de sodium, le carbonate de potassium, le calcaire, la dolomite et, dans une moindre mesure, les déchets de verres recyclés.

Dans la laine de roche et la laine de laitier les principaux oxydes sont le dioxyde de silicium et les métaux de terre alcaline, calcium et magnésium en particulier. Le dioxyde de silicium est dérivé principalement du basalte, des briquettes réfractaires recyclées, et de scories du four. Les oxydes de métaux de terre alcaline sont présents dans le calcaire, la dolomite et les briquettes réfractaires recyclées. Certains types de laine de roche et de laine de laitier ont des teneurs significatives d'oxyde d'aluminium, provenant des scories du four, de basalte et de matières recyclées. Certaines formules de verre, à faible contenu d'alumine, sont produites à partir de compositions de base, contenant d'importantes quantités de sable de fonderie et de calcin en plus du basalte et des scories.

La proportion de liants varie en fonction de l'application à laquelle est destiné le produit. Les produits à base de laine minérale en contiennent, généralement, entre 95 et 98 %, par masse de fibre. Dans quelques rares cas, on constate un pourcentage de 20 % de liant, avec 1 % d'huile minérale et 0,5 % d'ingrédients divers, par exemple le silicium. Les produits de laine de roche/laine de laitier contiennent, en général des proportions moindres de liants, par rapport à la laine de verre, destinée à des applications similaires. C'est la raison pour laquelle la densité des produits, destinés à être utilisés dans des applications analogues, diffère entre la laine de verre et la laine de roche/laine de laitier. La laine de roche nécessite parfois une densité deux fois supérieure à celle de la laine de verre, pour obtenir la même performance, en matière d'isolation thermique, surtout pour les produits à basse densité.

Tout comme dans les autres secteurs de production du verre, une masse considérable de matières premières sera dégagée sous forme de gaz, pendant le procédé de fusion. Cela dépend principalement de la quantité de calcin utilisée. Les pertes thermiques, pour un procédé moyen de production de laine de verre, se situant autour de 10 %. Des niveaux plus élevés peuvent être observés, lorsque d'importantes quantités de matières premières, à base de carbone, sont présentes dans la composition.

Les liants sont généralement présents sous forme de produits chimiques liquides. Mais on trouve également des poudres solides. Les formules des liants sont généralement confidentielles et ne sont pas révélées. La résine phénolique peut être fabriquée sur le site ou achetée, auprès de fournisseurs externes. Bien que l'emploi de la résine n'ait pas un impact considérable sur le procédé de fabrication de la laine minérale, en tant que tel, des problèmes de consommation et d'émission sont, en revanche, liés à la fabrication de la résine. Nous n'allons pas les traiter dans ce document. Mais le lecteur pourra trouver des données à ce sujet, dans des documents destinés à l'industrie chimique.

L'eau est utilisée, dans le procédé pour le refroidissement, le nettoyage, ainsi que la dilution et la dispersion des liants. Bien que l'étendue et les méthodes d'application dépendent de la technique

de fabrication. Les procédés de base consomment une quantité d'eau considérable et peuvent provoquer l'émission de vapeur d'eau et de gouttelettes, provenant des zones de formage et de traitement thermique. Le système de trempe du calcin, pour la fabrication de laine minérale, provoque également la formation de vapeur d'eau. Dans la plupart des installations on trouve un système de circulation des eaux de fabrication en circuit fermé, capable de réaliser un niveau élevé de recyclage. L'eau est véhiculée à l'intérieur du système de circulation de l'eau de procédé, à partir du réseau hydrique public, ou de sources naturelles locales. Une certaine quantité d'eau est également fournie par les matières premières, en particulier par les liants. La consommation globale d'eau pour le secteur de fabrication de la laine minérale est de 3 à 10 m<sup>3</sup>/tonne de produit, pour la laine de verre, et de 0,8 à 10 m<sup>3</sup>/tonne de produit, pour la laine de roche.

### 3.8.2 Emissions atmosphériques

[tm26 EURIMA]

Dans le secteur de la laine minérale, les émissions atmosphériques peuvent être réparties en trois catégories les émissions provenant de la manutention des matières premières, les émissions générées par les opérations de fusion et les émissions générées par les opérations en aval, ou par les opérations sur la chaîne de fabrication, entre autres, fibrage et formage, traitement thermique, refroidissement et finition du produit. L'une des émissions générées par les opérations en aval, particulièrement difficile à quantifier est l'odeur. Les odeurs sont principalement produites par les opérations de traitement thermique et semblent être générées par la décomposition des composants des liants. Ce paragraphe fournit des renseignements sur les émissions produites, en concentration et en masse, par installation, le tableau ci-dessous indiquant le volume du flux de déchets.

Opérations de fabrication		,x 1 000,	Volume des émissions du procédé
Manutention des matières premières		Nm <sup>3</sup> /h	1 à 5
Four	Electrique	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 20
	Flammes-gaz	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 40
	Combinaison	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 40
	Cubilot à vent	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 30
	Arc électrique immergé	Nm <sup>3</sup> /h	3 à 10
	Flammes-pierre	Nm <sup>3</sup> /h	10 à 50
Chaîne	Fibrage et formage	Nm <sup>3</sup> /h	100 à 400
	Traitement thermique produit	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 40
	Refroidissement produit	Nm <sup>3</sup> /h	10 à 40
	Finition produit	Nm <sup>3</sup> /h	5 à 70

Tableau 3.23 : Volume des émissions gazeuses pour la fabrication de laine minérale

#### 3.8.2.1 Matières premières

Dans la plupart des installations de production de laine de verre, les silos et les réservoirs à agitation, sont équipés de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières en dessous de 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques, provenant à la fois des installations équipées et non équipées de systèmes de filtrage, dépendent du nombre de transferts et de la quantité de matières premières manipulées. Il faut noter que les compositions de matières premières, employées dans la fabrication de la laine minérale, sont généralement sèches et sont, donc, transportées par voie pneumatique. Par conséquent, le risque d'émission de poussières, générées par la manutention des matières premières, peut être ici plus élevé que dans d'autres secteurs.

Dans la fabrication de laine de roche, on utilise généralement des matières premières grossièrement broyées, avec des particules de >50mm de diamètre. Les matières premières sont stockées dans des silos ou des trémies et leur manutention peut être manuelle ou par convoyeur mécanique. Lors du stockage ou de la manutention, les poussières peuvent être transportées par le vent, surtout par temps sec. Les émissions de poussières peuvent être contrôlées par l'application de toute une série de techniques, par exemple, la fermeture des convoyeurs et des trémies, l'humidification des tas de matières premières en magasin etc. Le niveau des émissions est difficile à quantifier et dépend, en grande partie de la quantité de matières premières manipulées, et des modalités d'application des techniques de contrôle.

### 3.8.2.2 Fusion

[tm26 EURIMA]

Les fours de production de la laine de verre sont principalement du type air-gaz, généralement équipés de boosting électrique. Mais on trouve également une proportion importante de fours électriques et une plus petite quantité de fours oxycombustion. Les fours pour la production de laine de roche sont, en grande partie, constitués de cubilots à vent chaud, alimentés au charbon, avec quelques rares exemples d'alimentation électrique ou au gaz. Les substances émises et les sources correspondantes sont mentionnées au Paragraphe 3.2.2.1. En ce qui concerne les aspects relatifs aux techniques de contrôle de la pollution, le mécanisme de formation des émissions polluantes est traité de façon plus détaillée au Chapitre 4.

Les cubilots, pour la production de laine de roche, se distinguent des fours traditionnels, par de nombreux aspects, en ce qui concerne les émissions générées par le procédé de production. L'un des plus significatifs est que les cubilots fonctionnent dans des conditions réductrices intenses. Par conséquent, les émissions de NOx sont relativement faibles, une partie du soufre, émis par le combustible, ou par les matières premières, étant réduit en acide sulfhydrique, et le niveau de monoxyde de carbone étant élevé. La plupart des installations sont équipées d'un système de postcombustion, apte à oxyder l'acide sulfhydrique, pour former du dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone, pour le transformer en dioxyde de carbone. Le charbon et les matières premières peuvent contenir des quantités de métaux, de chlorures et de fluorures, plus élevées que dans d'autres procédés de production du verre. Ce qui peut provoquer des émissions plus importantes de ces substances

Un facteur qui affecte, de manière de plus en plus importante, les émissions est l'apport en matières recyclées. Lorsqu'on recycle des fibres, contenant du liant, la composante organique doit être prise en considération. Dans les cubilots, cela ne constitue pas un problème. Mais dans les fondoirs à verre, il est parfois nécessaire d'ajouter des agents oxydants, tels que le nitrate de potassium, qui peuvent faire augmenter le niveau des émissions de NOx.

Dans la production de laine de roche, le ciment est parfois utilisé, pour la formation de briquettes de résidus solides de la fabrication et, une fois que les briquettes sont fondues, cela produit des émissions de SO<sub>2</sub>.

**Le Tableau 3.24 ci-dessous montre toutes les émissions, produites par les usines de fabrication de laine minérale dans l'UE, avec des chiffres par kg/tonne de verre fondu, entre parenthèses. Le Tableau 3.25 indique la moyenne estimée de 80 % des valeurs, avec des chiffres par kg/tonne de verre fondu entre parenthèses.**

Substance mg/m <sup>3</sup> . (kg/tonne de verre fondu)	laine de verre produite par fusion électrique	laine de verre produite par fours à flammes	Fusion combinée électricité/comb ustibles fossiles	Laine de roche produite dans des cubilots	laine de roche produite dans des fours à arc électrique immergé	laine de roche produite dans des fours à flammes
<b>Particules</b>	2 à 250 (0,004 à 1,0)	10 à 1000 (0,02 à 4,0)	10 à 1000 (0,02 à 4,0)	10 à 3000 (0,03 à 9,0)	10 à 30 (0,01 à 0,03)	10 à 50 (0,02 à 0,1)
<b>Oxydes de</b>		20 à 1000	20 à 1000	150 à 3500	1000 à 3000	30 à 300

soufre ,SO <sub>2</sub>		(0,05 à 4,0)	(0,05 à 4,0)	(0,4 à 10,0)	(1,0 à 3,0)	(0,06 à 0,6)
Oxydes d'azote ,NO <sub>2</sub>	15 à 500 (0,002 à 0,03)	100 à 1500 (0,5 à 6,0) <sup>(1)</sup>	100 à 1500 (0,5 à 6,0)	50 à 400 (0,14 à 1,1)	50 à 200 (0,05 à 0,2)	800 à 1500 (1,6 à 3,0)
Fluorures ,HF	0,5 à 5 (0,003 à 0,03)	0,5 à 5 (0,002 à 0,02)	0,5 à 5 (0,002 à 0,02)	1 à 30 (0,003 à 0,09)	1 à 5 (0,001 à 0,005)	0,5 à 5 (0,002 à 0,02)
Chlorures ,HCl	0,2 à 5 (0,001 à 0,03)	1 à 30 (0,004 à 0,08)	1 à 30 (0,004 à 0,08)	10 à 150 (0,03 à 0,4)	10 à 50 (0,01 à 0,05)	1 à 30 (0,002 à 0,02)
Acide sulfhydrique H <sub>2</sub> S				1 à 500 (0,003 à 1,4)	0 à 5 (0 à 0,005)	
Monoxyde de carbone				10 à 100000 (0,03 à 300)	30 à 100 (0,03 à 0,1)	
Dioxyde de carbone	30000 à 150000 0 (100 à 300)	150000 à 190000 0 (400 à 500)	150000 à 190000 0 (400 à 500)	130000 à 260000 (400 à 800)	20000 à 200000 (20 à 200)	150000 à 200000 0 (400 à 500)
Métaux <sup>(2)</sup>				0,1 à 30 (0,0003 à 0,09)		

**Tableau 3.24 : Valeurs complètes des émissions pour les opérations de fusion de laine minérale**

(1) Les niveaux les plus faibles de NOx concernent les fours oxycombustion.

(2) Les métaux sont émis principalement sous forme de particules.

Substance mg/m <sup>3</sup> . (kg/tonne de verre fondu)	laine de verre produite par fusion électrique	laine de verre produite par fours à flammes	Fusion combinée électricité/com bustibles fossiles	Laine de roche produite dans des cubilots	laine de roche produite dans des fours à arc électrique immergé	laine de roche produite dans des fours à flammes
particules	25 à 220 (0,08 à 0,9)	30 à 200 (0,06 à 0,8)	30 à 200 (0,06 à 0,8)	20 à 100 (0,06 à 0,3)	10 à 30 (0,01 à 0,03)	10 à 50 (0,02 à 0,1)
Oxydes de soufre SO <sub>2</sub>		20 à 100 (0,05 à 0,4)	20 à 100 (0,05 à 0,4)	400 à 2500 (1,1 à 7,1)	1000 à 3000 (1,0 à 3,0)	30 à 250 (0,06 à 0,5)
Oxydes d'azote NO <sub>2</sub>	200 à 400 (0,02 à 0,025)	500 à 1200 (2,5 à 4,8)	500 à 1200 (2,5 à 4,8)	80 à 250 (0,25 à 0,7)	50 à 200 (0,05 à 0,2)	1150 à 1250 (2,3 à 2,5)
Fluorures HF	0,5 à 1,0 (0,003 à 0,006)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,02)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,02)	1,0 à 15,0 (0,003 à 0,03)	1,0 à 5,0 (0,001 à 0,005)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,02)
Chlorures HCl	0,5 à 1,0 (0,003 à 0,006)	1,0 à 15,0 (0,004 à 0,04)	1,0 à 15,0 (0,004 à 0,04)	10 à 50 (0,03 à 0,2)	10 à 50 (0,01 à 0,05)	1,0 à 25 (0,002 à 0,015)
Acide sulfhydrique, H <sub>2</sub> S				1,0 à 200 (0,003 à 0,6)	0 à 5,0 (0 à 0,005)	
Monoxyde de carbone				30 à 80000 (0,1 à 250)	30 à 100 (0,03 à 0,1)	
Dioxyde de carbone	30000 à 150000 (100 à 300)	150000 à 190000 0 (400 à 500)	(400 à 500)	130000 à 260000 (400 à 800)	20000 à 200000 (20 à 200)	150000 à 200000 0 (400 à 500)
Métaux				0,1 à 2,0 (0,0003 à 0,006)		

**Tableau 3.25 : Moyenne de 80 % des émissions produites par la fabrication de laine minérale**

### 3.8.2.3 Emissions générées par des opérations autres que la fusion

[tm26 EURIMA]

Comme indiqué au Chapitre 2, les produits de laine minérale contiennent généralement un certain pourcentage de liants, à base de résine phénolique. La solution à base de liant est appliquée sur les fibres, dans la zone de formage, puis elle est réticulée et séchée, dans le four de traitement thermique. Les résidus gazeux, générés dans la zone de formage, contiennent des particules, du phénol, de la formaldéhyde et de l'ammoniaque.

Les particules sont composées, à la fois de matières organiques et inorganiques, parfois de très petites dimensions. De petites quantités de COV et d'amines peuvent également être détectées, si ces produits sont contenus dans les liants. Etant donné la nature du procédé, le flux gazeux présente un gros volume et un contenu d'humidité élevé. Les émissions provenant du four de traitement thermique, contiennent des liants volatiles, des produits de la décomposition des liants, de la vapeur d'eau et des produits de la combustion, provenant des brûleurs des fours de traitement.

Une fois sorti du four, le produit est refroidi à l'air. Ce gaz peut contenir des fibres de laine minérale et en moindres quantités de matières organiques. La finition du produit comporte la découpe, la manutention et l'emballage, qui peuvent provoquer des émissions de poussières.

Un facteur essentiel, pouvant influencer sur les émissions générées par le formage, le traitement thermique et le refroidissement, est la quantité de liant, appliquée au produit, les produits très chargés en liant provoquant généralement des émissions plus élevées. Les émissions générées par les liants dépendent essentiellement de la masse de liant solide, appliquée sur le produit, dans un laps de temps donné, et, donc du contenu élevé de liant, dans une moindre mesure, des produits à haute densité, peuvent provoquer des émissions plus élevées.

Le Tableau 3.26 ci-dessous montre les valeurs des émissions, dans leur ensemble, générées par les opérations en aval des installations de fabrication de laine minérale, dans l'UE, avec des valeurs par kg/tonne, entre parenthèses. Le Tableau 3.27 indique la moyenne de 80 % de l'échelle de valeurs.

Substance mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne de produit)	Fibrage, formage et traitement thermique	Fibrage et formage	Traitement thermique du produit	Refroidissement du produit	Finition du produit
Particules	10 à 200 (0,3 à 6,0)	10 à 200 (0,3 à 6,0)	5,0 à 55 (0,01 à 0,18)	10 à 50 (0,04 à 0,3)	1,0 à 50 (0,005 à 0,4)
Phénol	2,0 à 50 (0,05 à 1,6)	2,0 à 50 (0,05 à 1,5)	2,0 à 40 (0,004 à 0,11)	1,0 à 10 (0,004 à 0,06)	
Formaldéhyde	2,0 à 30 (0,05 à 1,2)	2,0 à 30 (0,05 à 1,0)	2,0 à 60 (0,004 à 0,17)	1,0 à 10 (0,004 à 0,06)	
Ammoniaque	20 à 250 (0,6 à 8,8)	20 à 250 (0,5 à 7,6)	30 à 460 (0,06 à 1,9)	1,0 à 50 (0,004 à 0,3)	
Oxydes d'azote ,NO <sub>x</sub>			50 à 200 (0,1 à 0,6)		
COV	5,0 à 150 (0,1 à 5,0)	5,0 à 150 (0,1 à 4,6)	5,0 à 150 (0,01 à 0,43)	1,0 à 30 (0,004 à 0,2)	
Dioxyde de carbone	(40 à 230)		20000 à 80000 (40 à 230)		
Amines	1,0 à 40 (0,1 à 1,3)	5,0 à 40 (0,1 à 1,2)	5,0 à 20 (0,01 à 0,06)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,03)	

**Tableau 3.26 : Valeurs complètes des émissions des chaînes de production de laine minérale mg/m<sup>3</sup>**

Substance mg/Nm <sup>3</sup> ,kg/tonne de produit,	Fibrage, formage et traitement thermique	Fibrage et formage	Traitement thermique du produit	Refroidissement du produit	Finition du produit
Particules	10 à 50 (0,9 à 1,9)	10 à 50 (0,6 à 3,5)	5,0 à 25 (0,01 à 0,07)	10 à 30 (0,04 à 0,2)	5,0 à 20 (0,03 à 0,16)
Phénol	5,0 à 25 (0,2 à 1,3)	5,0 à 25 (0,1 à 0,8)	5,0 à 15 (0,01 à 0,04)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,03)	
Formaldéhyde	5,0 à 20 (0,15 à 0,43)	5,0 à 20 (0,1 à 0,6)	5,0 à 30 (0,01 à 0,09)	1,0 à 5,0 (0,004 à 0,03)	
Ammoniaque	40 à 150 (1,8 à 5,4)	40 à 150 (1,0 à 4,5)	50 à 200 (0,1 à 0,6)	2,0 à 20 (0,007 à 0,12)	
Oxydes d'azote ,NO <sub>x</sub>			50 à 150 (0,1 à 0,4)		
COV	10 à 80 (0,2 à 2,7)	10 à 80 (0,3 à 2,4)	10 à 80 (0,02 à 0,23)	1,0 à 10 (0,004 à 0,06)	
Dioxyde de carbone	(40 à 230)		20000 à 60000 (40 à 170)		
Amines	5,0 à 20	5,0 à 20	5,0 à 10	1,0 à 5,0	

	(0,1 à 1,0)	(0,1 à 0,6)	(0,01 à 0,03)	(0,004 à 0,03)	
--	-------------	-------------	---------------	----------------	--

**Tableau 3.27 : Moyenne de 80 % de l'échelle de valeurs des émissions générées par les chaînes de production de laine minérale**

### 3.8.3 Emissions aqueuses

Dans des conditions de fonctionnement normales, les installations de production de laine minérale ne consomment pas beaucoup d'eau, et les émissions aqueuses ne sont pas importantes. Dans la plupart des installations on trouve un système de circulation des eaux de fabrication, en circuit fermé, et, quand cela est possible, les eaux de refroidissement et les eaux de nettoyage sont véhiculées à l'intérieur de ce système. Si elles sont incompatibles ou si les volumes sont trop importants, elles vont devoir être évacuées séparément. Beaucoup d'installations disposent, toutefois, de réservoirs de stockage, pouvant contenir le surplus d'eau qui pourra ensuite être réintroduit dans le système. Dans certaines usines, de l'eau de refroidissement, propre réchauffée, est déchargée dans les égouts ou dans des cours d'eau naturels. De petits volumes d'eau usée contaminée peuvent être produits par des liants chimiques, des déversements et des séparateurs d'huile etc. Ces volumes sont généralement déchargés dans le système de circulation des eaux de fabrication, traités en dehors du site ou évacués dans les égouts.

Les gros volumes d'eau, contenue dans le circuit de circulation du procédé, constituent un risque de contamination des eaux propres, telles que les eaux de surface et les eaux de trempage du calcin. Lorsque les circuits ne sont pas parfaitement conçus, ou ne sont pas correctement contrôlés, cela peut provoquer des émissions plus importantes. Si des techniques d'épuration, par voie humide sont appliquées, surtout l'épuration de produits chimiques, les émissions liquides qui en résultent peuvent ne pas être compatibles avec le circuit des eaux de fabrication. Ce qui donnera provoquera un flux de résidus liquides plus important.

### 3.8.4 Autres déchets

[tm26 EURIMA]

Les principales sources de déchets solides sont :

- Les déversements provoqués par la manipulation des matières premières.
- Le calcin recyclé, produit en trempant le verre chaud en fusion, dans de l'eau froide, pendant la phase de fibrage à la machine, dans la production de laine minérale.
- Le verre fondu non transformé en fibres, dans la fabrication de laine de roche, pendant les opérations de fibrage à la machine.
- Les poussières collectées dans les systèmes de réduction, en particulier les précipitateurs électrostatiques et les filtres à manches.
- Des résidus du fibrage de la laine de roche. Il s'agit de matériau lourd non fibreux et semi-fibreux, trop lourd pour pouvoir atteindre le convoyeur, qui est collecté sous la machine de fibrage. Environ de 10 à 20 % de la fusion forme des résidus, en touchant la machine de fibrage.
- Les ébarbures du produit.
- Les déchets de laine générés par le changement de produits, les arrêts de la chaîne ou les produits non conformes aux spécifications.
- Les déchets de fibres de laine de roche, ayant un contenu organique élevé, environ 50 % dans beaucoup de cas.
- Fer et matière fondue, générés par le débouchage du trou de coulée du cubilot, dans la fabrication de laine de roche.
- Matière fondue et roche, générées par l'arrêt du cubilot.



- k) Déchets solides provenant du filtrage du circuit de circulation des eaux usées. Cela représente entre 0,5 et 2,0 % du produit, et contient des fibres, des liants solides et jusqu'à 50 % d'humidité.
- l) Déchets d'emballage et autres déchets non spécifiques.
- m) Déchets réfractaires générés dans le cadre de la réfection des fours.

Dans la production de laine de verre on recycle généralement directement, dans le four les déversements de matières premières, faisant partie de la composition, le calcin de laine de verre et les poussières collectées par les systèmes de réduction. Dans la fabrication de laine de roche, des résidus solides, des résidus de la fusion et des poussières, collectées dans les systèmes de réduction, sont généralement recyclés, s'il existe un système de fabrication de briquettes. Les déchets fibreux peuvent être recyclés, après avoir été meulés et incorporés dans des briquettes, à condition, toutefois, qu'un système de recyclage, sous forme de briquettes soit en fonction. Les ébarbures sont souvent broyées et recyclées, dans la zone de formage, et dans certains cas, les déchets secs peuvent être broyés, pour obtenir des flocons de fibres.

Les déchets, générés par l'arrêt et le débouchage du trou de coulée des cubilots, peuvent en principe être recyclés, par le biais d'un système de fabrication de briquettes. Mais cela reste assez rare. Car il s'agit d'un matériau inerte qui peut être utilisé en tant que matériau de rebouchage, par exemple pour les routes. Il est également possible de séparer le minerai de fer métallique des résidus et de le vendre, en tant que ferraille. Mais cela n'est pas très intéressant d'un point de vue financier.

Nous ne possédons, pour le moment, aucune estimation du volume de déchets recyclés, dans le secteur de production de la laine minérale. Toutefois, le Tableau 3.28 ci-dessous, donne une indication de la pratique courante, dans le secteur, au moment de la rédaction du présent document.

	laine de verre	laine de roche et de laitier
quantité totale de déchets générée en pourcentage du produit	5 à 25 %	20 à 60 %
pourcentage total des déchets recyclés	10 à 100 %	0 à 100 %
pourcentage total des déchets éliminés en dehors du site.	0 à 90 %	0 à 100 %

**Tableau 3.28 : Génération et élimination des déchets solides dans le secteur de la laine minérale**

### 3.8.5 Energie

[tm26 EURIMA. tm14 ETSU]

Les principales sources d'énergie, pour la fusion de la laine minérale, sont le gaz naturel et l'électricité. La laine de roche est généralement produite dans des cubilots, alimentés au charbon. Mais on trouve également des exemples de fours au gaz et électriques. Le gaz naturel est utilisé, dans des volumes importants, pour le fibrage et le traitement thermique. L'électricité est utilisée pour les services généraux, tandis que le fioul à usage domestique, le propane et le butane, sont parfois utilisés comme combustibles d'appoint. Il y a également un certain nombre de fours oxycombustion, dans le secteur.

Les trois principaux domaines de consommation d'énergie sont la fusion, le fibrage et le traitement thermique. La répartition peut varier beaucoup d'un procédé à un autre et constitue un argument commercial sensible. Le Tableau 3.29 montre la consommation totale d'énergie, dans la production de laine minérale, répartie par opérations. Les chiffres du fibrage, du traitement thermique et autres consommations, sont des estimations faites par l'EIPPCB, d'après des échanges d'informations avec l'industrie et des chiffres à partir du [tm14 ETSU].

	laine de verre	laine de roche et de laitier
Consommation totale d'énergie, GJ/tonne de produit fini	11 à 22	7 à 18
Fusion. % de l'énergie totale.	20 à 45 %	30 à 70 %
Fibrage % de l'énergie totale.	25 à 35 %	25 à 35 %
Traitement thermique et séchage, % de l'énergie totale.	25 à 35 %	25 à 35 %
Autres % de l'énergie totale.	6 à 10 %	6 à 10 %

Tableau 3.29 : Consommation d'énergie dans la production de fibres de verre

La consommation directe d'énergie, pour la fusion électrique est comprise entre 3,0 et 5,5 GJ/tonne de produit fini. La consommation d'énergie, pour la fusion électrique, correspond à environ un tiers de celle requise, pour une fusion 100 % air-gaz et la consommation relative à chaque phase du procédé peut être estimée en conséquence. Le pourcentage d'erreurs possibles, dans ces valeurs, est très élevé. Mais elles donnent une indication de la consommation d'énergie.

### 3.9 Fibres céramiques

[tm8 S23.03. tm40 ECFIA]

Le principal produit est le produit fini. Le rendement des matières premières pour la fusion est généralement supérieur à 90 %, tandis que le rendement de la fusion au produit fini, couverture/vrac, peut aller de 55 % à 85 %. Toutefois, il faut noter que le rendement pour transformer la fusion en produit fini est une estimation et peut varier en fonction du type, de la nature, du volume et de la durée de la production. Notamment, le niveau le plus faible correspond à des productions spécifiques et moins complexes d'un point de vue technique.

#### 3.9.1 Apports utilisés dans le procédé

Il existe deux principales formules de produit le silicate d'alumine, très pur, et le silicate d'alumine de zirconium, dont les compositions figurent au Chapitre 2. Les principales matières premières figurent au tableau ci-dessous. Il s'agit en partie de substances naturelles, généralement transformées, et en partie de substances d'origine industrielle.

<b>Matières premières utilisées pour la fusion</b>	Oxydes d'aluminium. Calcium. Magnésium. Silicium et zirconium. Moindres quantités d'oxyde de potassium. Sodium. Titane. fer et chrome
<b>Traitements secondaires</b>	Pour le formage sous vide on utilise un mélange colloïdal humide d'amidon. latex silice ou argile. Des substances similaires peuvent être employées dans d'autres opérations. parfois on utilise également des matières de remplissage ainsi que des polymères et des résines organiques.
<b>Combustibles</b>	Electricité, gaz naturel, parfois fioul à usage interne, d'appoint, chauffage
<b>Eau</b>	Réseau public ou sources naturelles, puits, rivières et lacs
<b>Matériaux auxiliaires</b>	Matériaux d'emballage y compris le plastique, le papier, le carton et le bois. Huiles minérales, revêtement des fibres et autres usages non spécifiques. Produits chimiques pour le traitement des eaux de refroidissement et des eaux usées.

Tableau 3.30 : Matières premières utilisées dans le secteur des fibres céramiques

Les matières premières, pour la fusion, sont fondues pour obtenir les compositions nécessaires après fusion. En général, plus de 90 % de la composition est constituée d'oxydes de silicium d'aluminium et de zirconium. Le dioxyde de silicium est dérivé principalement de sable siliceux, de première qualité, tandis que l'oxyde d'aluminium, alumine, peut être d'origine naturelle, mais peut également provenir de la transformation de la bauxite. Le dioxyde de zirconium se trouve dans la nature, sous forme de baddeleyite, ou peut être produit de façon industrielle.

Les déchets sont généralement recyclés, si possible, directement dans le four, sous forme de poudres, et parfois, dans les produits, en tant que fibres. Le traitement secondaire peut être très spécifique, et les substances identifiées, dans le tableau pour le formage sous vide, sont habituelles, mais d'autres peuvent varier dans des proportions importantes.

Dans le secteur des fibres céramiques, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement des circuits et le nettoyage. L'eau de refroidissement circule, généralement en circuit fermé, pour refroidir différents équipements, avec des pertes provenant de l'évaporation et des fuites. L'eau est également employée dans les opérations de formage sous vide, ainsi que pour le carton et le papier. La consommation réelle d'eau, ainsi que la consommation par évaporation, peuvent varier, en fonction des conditions locales, entre autres la température ambiante et la dureté de l'eau.

La source énergétique, employée pour la fusion, est exclusivement l'électricité. Mais le gaz naturel est souvent utilisé, pour les opérations en aval, notamment le séchage.

### **3.9.2 Emissions atmosphériques**

#### **3.9.2.1 Matières premières**

Dans la plupart des installations, de production de fibres céramiques, les silos et les réservoirs à agitation, sont équipés de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières, en dessous de 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques provenant à la fois des installations, équipées de systèmes de filtrage et non équipées de systèmes de filtrage, dépend du nombre de transferts et de la quantité de matières premières manipulées.

#### **3.9.2.2 Fusion**

Les émissions, générées par la fusion, sont généralement très faibles, et essentiellement formées de poussières, provenant des matières premières qui sont souvent très pures et contiennent principalement des oxydes. Par conséquent, le dégazage est minime, tout comme les émissions de composés gazeux. La plupart des fours sont équipés de systèmes d'aspiration, avec filtres à manches. Les émissions de poussières sont généralement inférieures à 20 mg/m<sup>3</sup>.

#### **3.9.2.3 Activités en aval**

Les poussières et les résidus de fibres peuvent être générés par de nombreuses opérations, parmi lesquelles le fibrage et la collecte, l'aiguilletage, la combustion des lubrifiants, l'incision, l'ébarbage, la découpe, l'emballage et les transformations secondaires. Toutes les opérations, provoquant des émissions de particules ou de résidus de fibres, disposent généralement d'un système efficace d'aspiration qui est muni, à son tour, d'un filtre à manches en tissu. Les émissions de poussières sont généralement inférieures à 20 mg/m<sup>3</sup>, tandis que les émissions de fibres sont comprises entre 1 et 5 mg/m<sup>3</sup>. De faibles volumes d'émissions organiques, provenant d'opérations secondaires, peuvent également être constatés. Mais ils sont généralement inférieurs à 50 mg/m<sup>3</sup>.

### **3.9.3 Emissions aqueuses**

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'eau est principalement utilisée, pour le refroidissement, le nettoyage, le formage sous vide et autres opérations de transformation secondaire. Les émissions aqueuses se limitent donc à l'épuration des circuits de refroidissement, et à l'écoulement des eaux de nettoyage et des eaux de surface. Les eaux de nettoyage présentent uniquement les problèmes habituels, présents dans toute installation industrielle, à savoir la présence de solides inertes et d'huile. L'épuration du système de refroidissement contient des sels dissous et des produits chimiques de traitement de l'eau. La qualité de l'eau de surface dépendra du niveau de séparation du réseau de drainage et de la propreté du site. L'eau, utilisée pour le formage sous vide, est recyclée après épuration. Car elle peut contenir de faibles quantités de substances organiques. Des techniques simples de contrôle de la pollution, telles que le tassement, le tamisage, l'utilisation de séparateurs d'huile et la neutralisation, sont appliquées.

### **3.9.4 Autres déchets**

[tm40 ECFIA]

Les volumes de déchets solides sont généralement faibles. Lorsque cela est possible, les déchets tels que les matières premières de la composition, le calcin et les ébarbures sont, soit directement recyclés dans le four, cela nécessite une transformation, lorsqu'il s'agit de fibres, soit incorporés dans les produits. Les déchets sont également constitués par les poussières, collectées dans les systèmes de réduction. En général, ces résidus ne sont pas directement recyclés dans le four, en raison de la contamination possible et de l'incertitude, concernant leur composition. Mais des études sont en cours, pour examiner cette possibilité. La nature de ces résidus fait qu'ils sont difficiles à éliminer, et cela encourage les recherches pour des solutions alternatives.

Une grande partie des matières premières sont livrées en vrac, ce qui réduit les déchets d'emballage. Les déchets provenant de l'emballage du produit fini, plastique, carton, bois, etc., sont généralement réutilisés ou recyclés. D'autres déchets, non spécifiques à ce secteur, sont éliminés par des moyens traditionnels, ou recyclés, si les normes locales et nationales le permettent. Au terme de la durée de vie d'un four, sa structure réfractaire est démontée et remplacée. Lorsque cela est possible, ce matériau est récupéré, pour être réutilisé ou vendu.

Le production globale de déchets, du secteur des fibres céramiques, dans l'UE est de 700 à 900 tonnes /an, de déchets fibreux, et de 100 à 700 tonnes, d'autres déchets.

### **3.9.5 Energie**

[tm40 ECFIA]

Nous disposons de peu de données concernant la consommation d'énergie dans ce secteur. La fusion est exclusivement électrique et les pertes volatiles sont peu importantes. Par conséquent, le rendement thermique, directement lié à la fusion, n'apporte pas de questions non relatives au site, est relativement élevé, bien que la composition nécessite une énergie de fusion très importante et que les fours soient relativement petits. La consommation d'énergie est comprise entre 6,5 et 16,5 GJ/tonne, de verre fondu. Pour les autres opérations, elle se situe entre 3,5 et 9,5 GJ/tonne de produit, avec un rapport de transformation de 75 % entre matières premières et produit fini.

### 3.10 Frittes

Le principal produit est le produit fini et le rendement de la fusion, réalisée avec les matières premières, est de 75 à 80 %, selon les formules. La plupart des pertes sont représentées par le CO<sub>2</sub>, émis pendant la fusion. La fabrication ne génère pas de calcin, en tant que tel, et le seul matériau généralement recyclé ce sont les poussières, collectées dans le système de réduction. Ce qui n'affecte pas particulièrement le rendement, notamment de base qui est assez élevé. Car les matières sont simplement trempées, les seules pertes sont des solides, qui ne peuvent être séparés de l'eau.

#### 3.10.1 Apports utilisés dans le procédé

[tm46 ANFFECC]

Les principales matières premières utilisées, pour les formules les plus courantes, figurent dans le tableau ci-dessous, avec des compositions indicatives. Les chiffres précis peuvent varier, mais ceux du tableau sont donnés principalement à titre indicatif.

Type de fritte	Matières premières	% approx. dans la composition
<b>Frittes céramiques/de verre</b>	Composés du Zirconium	7,7
	Feldspath	26,8
	Quartz	25,9
	Acide borique	6,8
	Oxyde de zinc	8,4
	Dolomite	8,4
	Carbonate de calcium	13,4
	Nitrate de potassium	2,6
<b>Frittes émaillées</b>	Borax	19,1
	Quartz	42
	Nitrate de sodium	7,8
	Fluorsilicate de sodium	1,2
	Fluor silicate de potassium	7,8
	Phosphate de sodium	3,2
	Oxyde de titane	18,9
<b>Frittes à bas point de fusion</b>	Minium Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	50
	Quartz	19,8
	Oxyde de zinc	15,1
	Acide borique	15,1

**Tableau 3.31 : Principales matières premières utilisées dans la production de frittes**

L'eau est utilisée pour le refroidissement et le nettoyage, mais aussi pour refroidir et briser le verre fondu, par trempé, et pour le broyage humide. Tous les circuits, de circulation de l'eau, sont généralement fermés et provoquent des pertes par évaporation et par épuration. Les autres pertes d'eau sont dues à la teneur en eau du produit et des solides, collectés dans le circuit de l'eau de trempé. La consommation d'eau est estimée entre 0,5 et 1,5 m<sup>3</sup>/tonne de frittes.

Le principal combustible utilisé est le gaz naturel. Le fioul est également employé dans certaines installations, mais moins habituellement, <10 %. De nombreuses installations sont du type oxycombustion et consomment des volumes assez importants d'oxygène.

### 3.10.2 Emissions atmosphériques

#### 3.10.2.1 Matières premières

Dans la plupart des procédés de production de verres spéciaux, les silos et les réservoirs à agitation, sont équipés de filtres, aptes à réduire les émissions de poussières, en dessous de 5 mg/m<sup>3</sup>. Les émissions massiques, provenant à la fois des installations équipées de systèmes de filtrage, et non équipées de systèmes de filtrage, dépendent du nombre de transferts, de la taille des granules et de la quantité de matières premières manipulées. Certains procédés de fabrication de frites, quoique rares, utilisent des matières premières à base de plomb et d'autres métaux lourds. La manipulation de matières, contenant des composants toxiques, peut provoquer des émissions de ces substances. Des mesures efficaces sont presque toujours mises en place, afin de minimiser celles-ci.

#### 3.10.2.2 Fusion

Dans le secteur de production des frites, le principal risque d'émission, ce sont les émissions atmosphériques à partir des activités fusion. Les substances émises et les sources correspondantes figurent au Paragraphe 3.2.2.1. Tous les fours utilisés dans ce secteur sont alimentés au combustible fossile, gaz naturel et parfois fioul. Le tableau ci-dessous montre une série de valeurs d'émission, constatées dans ce secteur, aucune répartition statistique n'est disponible.

Substance	Concentration mg/m <sup>3</sup> .	Emissions massiques kg/tonne de fusion
Poussières	5 à 850	0,1 à 9,0
Oxydes d'azote, NO <sub>2</sub>	290 à 2000	0,4 à 16,0
Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub>	<50 à 4000	0,4 à 32,0
Chlorures, HCl	0,1 à 20	<0,01 à 0,16
Fluorures, HF	0,1 à 100	<0,01 à 0,8
Métaux	<1 à 25	<0,01 à 0,2

**Tableau 3.32 : Niveaux d'émission des fours à frites**

Les émissions de poussières dépendent du fait que l'installation soit équipée ou non d'un système de réduction. La plupart des installations sont équipées de filtres à manches. Les oxydes d'azote dépendent principalement du système de combustion. Un grand nombre de fours sont du type oxycombustion, ce qui correspond aux valeurs les plus faibles d'émissions massiques, parmi celles indiquées ci-dessus. Toutefois, la plupart des fours sont alimentés au combustible fossile, et les émissions d'oxydes de soufre sont inférieures à 200 mg/m<sup>3</sup>, en fonction de la quantité de sulfates présente dans la composition.

#### 3.10.2.3 Activités en aval

Les émissions atmosphériques, générées par les opérations en aval, sont très faibles. Le broyage est en grande partie réalisé par voie humide. Mais le broyage à sec peut provoquer des émissions de poussières, en l'absence de réduction.

### 3.10.3 Emissions aqueuses



Les émissions aqueuses consistent en l'écoulement des eaux de refroidissement, de nettoyage et des eaux de surface. Les circuits de trempe et de broyage sont généralement fermés, avec de l'eau fraîche d'appoint, et parfois ils sont soumis à épuration, pour éviter la formation de sels. Le niveau des émissions est très faible, mais peut contenir des déchets solides en suspension et dans certains cas, il peut y avoir des métaux lourds. Les métaux sont généralement agglomérés au verre et peuvent être éliminés par des techniques appropriées de séparation des solides.

#### **3.10.4 Autres déchets**

Les déchets solides sont généralement peu importants. Les principaux déchets provenant de la fabrication sont les solides, surtout des frites, extraits des circuits d'eau. Ces déchets ne sont pas généralement recyclés, car leur composition est trop variable. Dans la majorité des usines, le rapport entre déchets et produits se situe autour de 0,5 à 3 %.

La plupart des matières premières, utilisées dans la fabrication du verre, sont livrées en vrac, et ne génèrent donc pas de déchets d'emballage. Les déchets provenant de l'emballage des produits finis, plastique, carton et bois, sont généralement réutilisés ou recyclés, autant que possible. Les autres déchets, non spécifiques à ce secteur, sont éliminés par les moyens habituels ou bien recyclés. Si les normes locales ou nationales le permettent. Au terme de la durée de vie d'un four, sa structure réfractaire est démontée et remplacée. Lorsque cela est possible, ce matériau est récupéré pour être réutilisé ou vendu.

#### **3.10.5 Energie**

Nous disposons de très peu de données sur la consommation d'énergie dans ce secteur. Les fours sont en grande partie, > 90 %, alimentés au gaz. Bien qu'on trouve également des fours au fioul et des fours à double alimentation. Nous ne connaissons aucun exemple d'alimentation électrique, dans ce secteur, à l'échelle industrielle. Les fours utilisés, dans ce secteur, sont généralement plus petits que la majorité des fours utilisés dans les autres secteurs de production du verre. Peu de fours individuels dépassent la capacité de 20 tonnes/jour. Une installation comporte généralement plusieurs fours de petites dimensions. Chacun est destiné à une production particulière. Toutefois, l'affinage nécessaire est généralement inférieur et la consommation globale d'énergie, par tonne de fusion, et comparable à celle des autres secteurs, à savoir environ 13 GJ/tonne. La consommation d'énergie, en dehors de la phase de fusion, est très faible, les activités en aval étant extrêmement limitées et les produits n'étant pas généralement séchés.

Beaucoup de fours, en Europe du Nord, sont du type oxycombustion, ce qui permet des économies d'énergie considérables. On a parfois constaté une diminution de la consommation d'énergie de 50 %.



## 4 TECHNIQUES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA DEFINITION DES MTD

### 4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux techniques de réduction des émissions, considérées les plus appropriées, dans la définition des meilleures techniques disponibles, de façon générale, et pour des installations spécifiques. L'industrie du verre présente une grande variété de produits, de procédés et de techniques de fabrication et peut, par conséquent, appliquer une large série de techniques de réduction. Toutefois, l'adéquation et l'efficacité, de ces techniques, peut varier de manière importante, d'une application à l'autre.

Ce chapitre est réparti en plusieurs paragraphes qui traitent :

- Du choix de la méthode de fusion.
- De la manutention des matières premières.
- Des techniques de contrôle des émissions atmosphériques générées par la fusion.
- Des techniques de contrôle des émissions atmosphériques générées par les autres opérations.
- Des techniques de contrôle des émissions aqueuses.
- Des techniques de réduction des autres déchets.
- De la consommation d'énergie.

Le principal impact de l'industrie du verre, sur l'environnement, ce sont les émissions atmosphériques de la fusion. Les techniques appliquées, pour réduire ces émissions, sont décrites au Paragraphe 4.4 qui est le plus important et le plus détaillé de ce chapitre. La plupart des méthodes décrites s'appliquent à toutes les installations de l'industrie du verre, et possèdent une base commune. C'est la raison pour laquelle le Paragraphe 4.4 a été structuré à partir des substances et les différentes techniques de réduction sont décrites pour chacune d'entre elles. Chaque technique a été décrite dans le paragraphe consacré à la substance pour laquelle elle présente une efficacité maximale. Mais souvent une technique peut avoir des effets sur plusieurs substances. Les effets sur les autres substances ont été décrits, lorsque cela était nécessaire, avec des références croisées, dans les autres paragraphes.

Les termes "mesures primaires et secondaires" sont utilisés dans différentes parties du document. Bien que peu précis, ces termes aident à classer certaines techniques, dans une catégorie donnée. En général, les techniques primaires sont celles qui réduisent ou évitent la formation d'émissions polluantes. Tandis que les mesures secondaires agissent sur les émissions polluantes, pour les rendre moins nocives, par exemple en les transformant en d'autres substances, ou bien en les collectant, sous une forme pouvant être réutilisée, recyclée ou éliminée. Lorsque certaines techniques ne rentrent pas dans une catégorie précise, nous l'avons indiqué dans le texte.

Les données relatives aux techniques ont été fournies, autant que possible, de manière cohérente, en les regroupant sous cinq titres principaux. Toutefois, pour certaines techniques, notamment certaines mesures primaires, cette présentation n'est ni la plus logique, ni la plus efficace et, dans ce cas, les paragraphes ont été structurés différemment. Les cinq titres sont :

- Description de la technique – analyse des principes de la technique et de ses modalités d'application dans l'industrie du verre
- Performances environnementales – description des niveaux d'émission obtenus.
- Considérations d'ordre financier – avec des informations sur les coûts, investissement, exploitation et infrastructures, si disponibles.
- Applicabilité – problèmes relatifs aux différentes applications.

- Considérations annexes – incluant les effets internes et externes et l'impact, en dehors des émissions, ainsi que les coûts, consommation d'énergie, flexibilité du procédé, qualité du produit, durée de vie des fours, émissions en dehors du site et formation des scories au cours du procédé de production.

Une remarque importante, à prendre en compte dans ce chapitre, est qu'une technique qui a donné de bons résultats dans une application précise, pourra avoir des effets tout à fait différents, appliquée à un autre secteur, ou dans une autre installation du même secteur. Les coûts, les performances environnementales et les avantages/inconvénients annexes, peuvent varier énormément, d'un secteur à l'autre et d'une installation à l'autre. La disponibilité et l'applicabilité de chaque technique sont analysées, dans une série de situations.

Afin d'évaluer l'applicabilité d'une technique donnée, à un procédé de fusion en continu, il faut d'abord considérer si elle est applicable au four, pendant la campagne, ou si elle ne peut être appliquée, ou mieux appliquée, que lors de la réfection du four. L'une des caractéristiques de la fabrication du verre est que les fours ont une durée de vie limitée, au terme de laquelle ils doivent être réparés, ou bien totalement ou partiellement reconstruits. Généralement les fours à combustible fossile, utilisés pour la production de verre d'emballage, de verre plat, de laine de verre, de fibres de verre à fil continu et de silicate de sodium, fonctionnent en continu, pendant 8 à 12 ans. Les fours à combustible fossile, pour la production de verres spéciaux et de gobeletterie, fonctionnent généralement en continu, pendant 3 à 8 ans. Quant aux fours électriques, ils ont tendance à avoir des durées de vie plus courtes, c'est à dire de 2 à 7 ans, pour toutes sortes d'applications. D'autres types de fours, comme les cubilots et les fondoirs à verre en discontinu, fonctionnent pendant de plus courtes périodes, allant de quelques jours à quelques semaines.

Il existe deux principaux types de réfection, pour les fours en continu :

- La réfection "normale", dans laquelle la partie réfractaire du four et, si nécessaire, les régénérateurs, sont réparés par un remplacement total ou partiel du matériau. Le châssis du four n'est pas sensiblement modifié et ses dimensions restent à peu près inchangées. Lorsque des modifications importantes de la structure ou de la technologie du four ne sont pas nécessaires, il s'agit du type de réfection le plus courant, entre deux campagnes.
- Une réfection "complète" comporte généralement une réparation ou un remplacement du châssis du four, en plus du remplacement du matériau réfractaire. Ceci peut être comparé à la construction d'un nouveau four, bien que, dans la plupart des cas, une grande partie de l'infrastructure existante et que les régénérateurs soient conservés. Ce type de réfection est moins courant. Il est généralement appliqué lorsque des modifications importantes, dans la structure du four, par exemple l'extension de la zone de fusion ou des modifications importantes de la capacité d'alimentation, ou de sa technologie sont nécessaires. Une réfection complète implique généralement des coûts bien plus élevés qu'une réfection normale.

Pendant la campagne d'un four, la possibilité d'introduire des modifications importantes est limitée. Toutefois, des réparations à chaud, pour le remplacement de réfractaires endommagés, sont souvent réalisées, tout comme des modifications ou des remplacements de brûleurs. Des modifications importantes, relatives à la technologie de fusion, sont généralement effectuées, de façon plus économique, lors de la réfection du four. Ceci vaut également pour l'application de systèmes de réduction secondaires complexes. Toutefois, de nombreuses améliorations, concernant le fonctionnement du four, y compris l'installation de techniques secondaires, sont possibles, pendant le fonctionnement du four. Ces questions sont traitées dans le cadre de l'analyse de l'applicabilité des différentes techniques.

La distinction entre réfection normale et réfection complète n'est pas absolue et il existe une série de nuances, entre la réfection normale la plus simple et la démolition et réfection totale d'un four. Par exemple, une petite réparation ou une modification secondaire, peuvent être effectuées à chaud ou à froid. Une réfection secondaire peut également être réalisée, lors d'une réparation à froid, comportant la conservation de la plupart des matériaux réfractaires et le remplacement uniquement des pièces endommagées. Le facteur le plus important, qui affecte à la fois les coûts et la latitude à mettre en place de nouvelles technologies, est de savoir si des modifications importantes doivent être apportées au châssis du four et, dans ce cas de quelles dimensions.

Pour des fours de plus petites dimensions, impliquant des réfections moins fréquentes et des investissements moins importants, les avantages apportés par la coordination des améliorations environnementales et les réparations du four, sont moins significatifs. Toutefois, les améliorations environnementales peuvent être plus économiques, si elles sont associées à d'autres investissements.

## 4.2 Choix des techniques de fusion

Les techniques de fusion, employées dans l'industrie du verre, figurent au Chapitre 2. Elles peuvent varier, en taille des fours, depuis les pots de petites dimensions, aux grands fours régénératifs qui produisent plus de 600 tonnes de verre/jour. Le choix de la technique de fusion dépend de plusieurs facteurs, notamment de la capacité nécessaire, de la composition du verre, des prix des combustibles et de l'infrastructure existante. Le choix est l'une des principales décisions d'ordre technique et financier, pour une nouvelle installation ou pour la réfection d'un four. Les facteurs essentiels sont la capacité nécessaire et le type de verre.

Le choix entre un four à récupération et un four régénératif est une décision d'ordre technique et financier, qui ne constitue pas, généralement, un élément fondamental, dans la définition des MTD. C'est la raison pour laquelle nous n'allons aborder que brièvement ici, les aspects relatifs à l'environnement. Le choix entre l'alimentation traditionnelle, air-combustible, et l'alimentation électrique ou oxycombustion est, en revanche, un facteur très important, dans la définition des MTD et ces techniques sont décrites à part. De même, d'autres techniques spécifiques de fusion, par exemple les fondoirs à verre Sorg LoNOx, seront traitées séparément, dans les paragraphes consacrés aux différentes substances.

Chacune des techniques, décrites au Chapitre 2, a des avantages, des inconvénients et des limites. Par exemple, au moment de la rédaction du présent document, la meilleure méthode, à la fois d'un point de vue technique et économique, pour produire de gros volumes de verre float, est l'utilisation de grands fours régénératifs, à brûleurs transversaux. Les solutions alternatives n'ont pas été suffisamment testées dans le secteur, par exemple la fusion à l'oxygène, ou bien elles compromettent les aspects techniques et économiques de l'activité, par exemple la fusion électrique ou les fours à récupération.

Les performances environnementales d'un four proviennent, à la fois du choix de la technique de fusion, de la méthode d'exploitation et de la mise en place de mesures de réduction secondaire. Les techniques de fusion les moins polluantes pour l'environnement, ou qui peuvent être contrôlées par des techniques primaires, sont généralement privilégiées, par rapport à celles qui utilisent une réduction secondaire. Toutefois, les aspects pratiques, tant techniques qu'économiques, doivent être pris en compte et le choix définitif devra garantir un bon équilibre entre ces facteurs.

Les performances environnementales des différentes techniques, diffèrent beaucoup selon le type de verre produit, la méthode d'exploitation et la structure. Par exemple, les émissions, avant réduction secondaire, d'un four à récupération, proche de la fin de sa durée de vie, pour la production de verre pour téléviseurs, avec adjonction de nitrates, auront peu de points en commun avec les émissions d'un four à récupération, de construction récente, pour la production

de fibres de verre, dont la géométrie, la composition et l'alimentation ont été optimisées. Tous ces facteurs rendent difficile et peu utile la comparaison quantitative directe entre les différentes techniques de fusion. Par conséquent, les paragraphes suivants ne font que synthétiser les principales questions d'ordre environnemental, pour chacune des techniques décrites au Chapitre 2. La fusion à l'oxygène et les fours spéciaux sont traités, respectivement, aux paragraphes 4.4.2.5 et 4.4.2.3. Les différences de volumes d'émission, entre un type de four et l'autre sont traitées, si nécessaire, dans les paragraphes de ce chapitre, spécifiquement consacrés aux différentes substances.

La fusion électrique diffère d'autres techniques décrites ci-dessous. Car elle constitue une évolution fondamentale de la technologie qui a un impact considérable sur les émissions. La fusion électrique est présentée comme l'une des techniques spécifiques, à prendre en considération dans l'évaluation des MTD. Toutefois, étant donné son impact sur toutes les émissions, elle ne peut être aisément intégrée dans ce chapitre, basé sur une approche par substances, et c'est la raison pour laquelle elle est présentée dans ce paragraphe.

### **Fours régénératifs**

Ces fours consomment généralement moins d'énergie que les autres types de fours traditionnels, à combustible fossile, en raison de leur système plus efficace de préchauffage de l'air de combustion. Leur faible consommation d'énergie, par tonne de verre fondu, permet la réduction d'un grand nombre de substances polluantes, associées à la combustion. Toutefois, les hautes températures de préchauffage favorisent la formation de Nox. Ces types de fours ont donné de très bons résultats, avec des techniques primaires de contrôle des émissions, notamment en ce qui concerne le NOx. Les fours à boucle ont généralement un meilleur rendement énergétique et des émissions plus faibles que les fours à brûleurs transversaux. Toutefois, dans certains cas, les mesures primaires, de contrôle du Nox, donnent de meilleurs résultats avec les fours à brûleurs transversaux.

Etant donné l'important investissement initial que représentent les fours régénératifs, ceux-ci ne sont viables, d'un point de vue économique, que pour des gros volumes de production, en général >100 tonnes par jour. Mais il existe également des exemples de fours plus petits. Pour des taux de production de >500 tonnes par jour, les fours à brûleurs transversaux, sont généralement utilisés, pour obtenir un bon réglage de la chaleur, sur toute la longueur du four.

### **Fours à récupération**

Ces fours sont moins rentables, d'un point de vue énergétique, que les fours régénératifs. Mais ils peuvent récupérer une quantité considérable de chaleur, par le biais de leur système de récupération. Des améliorations supplémentaires du rendement énergétique peuvent être réalisées par l'utilisation d'autres techniques, comme le boosting électrique, les chaudières à récupération, le préchauffage des gaz et le préchauffage de la composition et du calcin. Les températures de préchauffage sont inférieures à celles des fours régénératifs et des résultats satisfaisants peuvent être réalisés, avec des mesures primaires de contrôle du NOx.

### **Fusion combinée au combustible fossile et à l'électricité**

Cette technique peut être appliquée selon deux approches distinctes, une alimentation majoritaire au combustible fossile, avec boosting électrique, ou une alimentation majoritaire à l'électricité, avec du combustible fossile d'appoint. De nombreux fours sont équipés de systèmes de boosting électrique, qui peuvent fournir de 2 à 20 %, de l'apport total d'énergie. Généralement, dans les fours de production du verre d'emballage et du verre float, la quantité de boosting électrique est très limitée, <5 %, en raison du coût de l'énergie électrique. Le boosting



électrique réduit le volume des émissions, directement produites par le four, en remplaçant partiellement la combustion par l'alimentation électrique, pour une tirée de filière donnée. Comme indiqué au Paragraphe 4.2.1 ci-dessous, dans une perspective plus générale, les réductions réalisées sur le site devraient être comparées aux émissions, associées à la génération de l'énergie électrique.

En raison de son coût important, le boosting électrique n'est pas, généralement, une solution viable à long terme, pour la réduction des émissions, dans la production de base. Il s'agit d'un outil fonctionnel, dont l'utilisation est limitée par des questions d'ordre économique et technique. Le boosting électrique a un effet bénéfique, sur les émissions du four, et peut être associé à d'autres techniques, telles que l'emploi de brûleurs à faible taux de Nox, afin d'améliorer la fusion et de réduire les émissions. Mais il ne s'agit en aucun cas d'une solution rentable, si elle est utilisée seule. Le boosting électrique peut également être utilisé pour améliorer les courants de convection, à l'intérieur du four, en facilitant ainsi le transfert de chaleur et les opérations d'affinage.

La surcuisson, au combustible fossile, dans un four à alimentation électrique majoritaire, est une technique beaucoup moins fréquente. Cela permet d'obtenir la plupart des avantages offerts par la fusion électrique, en contournant certains obstacles de nature technique et économique, que présente cette méthode. L'utilisation de brûleurs augmente le taux de fusion des matières premières. Bien entendu, la combustion des combustibles fossiles provoque des émissions, qui dépendent du taux d'apport de chaleur. Un grand nombre de techniques de réduction des émissions, traitées dans ce chapitre, peuvent être appliquées à ces fours, y compris les brûleurs à faible taux de NOx et la fusion à l'oxygène.

### **Fusion en discontinu**

La technique généralement utilisée, pour la fusion en discontinu, à bas volume de production, est celle des fours à pots. Bien que d'autres techniques, telles que les réservoirs journaliers et le Flex Melter, deviennent de plus en plus courantes. Le choix de la technique dépend généralement de la logistique spécifique à l'installation, en particulier le volume de production, le nombre de compositions différentes produites et les exigences des clients. La plupart des mesures de réduction primaires, décrites dans le présent chapitre, seront plus ou moins applicables à ces fours. Les techniques les plus efficaces semblent être l'optimisation de la composition et les techniques de combustion. Etant donné la structure des fours à pots, les techniques donneront en général de meilleurs résultats pour les réservoirs journaliers et les fours en semi-continu. Lorsque l'utilisation des réservoirs journaliers ou de la fusion en continu/semi-continu est possible, on obtiendra une consommation d'énergie moins importante et des émissions plus faibles.

### **Fusion de la laine de roche**

La technique la plus courante, pour la fusion de la laine de roche est le cubilot. Mais il y a également des exemples de fusion électrique et au gaz. Dans plusieurs cas, ces solutions alternatives ont été conçues comme des usines pilotes, pour étudier la viabilité à long terme des techniques, ou bien elles ont été choisies à cause de conditions locales particulières. Le cubilot présente un certain nombre d'avantages fonctionnels et, grâce à cela, c'est la technique préférée dans le secteur. Les solutions alternatives ne présentent pas d'avantages environnementaux importants ou bien on leur viabilité technique et économique n'a pas été démontrée, pour une application plus large.

## **4.2.1 Fusion électrique**

### **Description de la Technique**

La technique est décrite au Chapitre 2. Car il s'agit d'une technique de fusion de base, commune à plusieurs secteurs. La fusion électrique a un impact important, sur les émissions polluantes, et sera traitée dans ce chapitre, en tant que technique de réduction "primaire".

### Performances environnementales

Le remplacement total des combustibles fossiles, à l'intérieur du four, empêche la formation des produits de la combustion, et notamment, des oxydes de soufre, du NOx thermique et du dioxyde de carbone. Les autres émissions sont des particules transportées et la décomposition des matières premières, notamment le CO<sub>2</sub>, dégagé par les carbonates, le NOx provenant des nitrates et le Sox, contenu dans les sulfates. Dans la plupart des applications, l'utilisation de sulfates est assez faible. Car ils ne sont pas importants pour l'affinage, et ils sont utilisés principalement en tant qu'agents oxydants.

On rencontre aussi de faibles niveaux d'émission d'halogénures, par exemple HF, ou de métaux, lorsqu'ils sont présents dans les matières premières. En revanche, les compositions dans lesquelles ont été ajoutés des fluorures peuvent provoquer des émissions importantes. L'émission des composants volatiles de la composition est considérablement inférieure à celle des fours traditionnels, car le flux de gaz est moins important et en raison de l'absorption, de la condensation et de la réaction des émissions gazeuses, dans la couverture de composition, qui recouvre généralement la surface de la fusion.

Les fours présentent, généralement, une ouverture latérale et des courants d'air considérables se forment, en raison des émissions gazeuses et de la chaleur, produite par la fusion. Il faut donc créer un système de ventilation, soit par courant d'air naturel, soit par aspiration, pour permettre la sortie des poussières, des gaz et de la chaleur, sans qu'ils envahissent la zone de travail. Les gaz résiduels, émis par le courant d'air naturel, ne constituent pas de gros volumes. Mais ils peuvent avoir des concentrations de poussières élevées et une faible dispersion.

Les émissions de poussières peuvent être véhiculées par aspiration, vers un système de réduction qui, étant donné le faible volume d'émission, est généralement constitué d'un filtre à manches. Ceci permet de faibles émissions de poussières et de traiter les émissions de HF par épuration à sec, si nécessaire, Cf. paragraphes 4.4.1.3 et 4.4.4.2.

Les émissions dépendent, en grande partie, de la composition utilisée, et, étant donné le faible flux de gaz, une comparaison des concentrations des émissions peut être trompeuse. Toutefois, à titre purement indicatif, les émissions globales directes sont réduites, d'un facteur compris entre 10 et 100, par rapport à un four traditionnel air-combustible, ayant un tirage de filière similaire. Vous trouverez quelques données quantitatives au Chapitre 3, pour le secteur de la laine minérale, ainsi que dans les études de cas, décrites à l'Annexe 1.

### Considérations financières

La viabilité économique, de la fusion électrique, dépend principalement de la différence de prix, entre l'électricité et les combustibles fossiles. Au moment de la rédaction de ce document, le prix de l'électricité, par unité d'énergie est de 4 à 5 fois supérieur, à celui du fioul. Le prix de l'électricité peut varier jusqu'à 100 %, entre les différents Etats Membres. Alors que les prix des combustibles fossiles sont plus équilibrés. Le prix du combustible, et les différences correspondantes, sont traités au paragraphe 4.4.3.1. Le rendement thermique des fours électriques est très élevé, en général de 2 à 4 fois supérieur à celui des fours traditionnels. Les fours de grandes dimensions, à haut rendement thermique, se situent tout en bas de cette échelle, et les fours de petites dimensions, tout en haut.

L'investissement pour les fours électriques est bien inférieur à celui requis, pour les fours traditionnels et, lorsqu'il est annualisé, il compense en partie les coûts d'exploitation plus élevés.

Toutefois, ces fours ont des durées de vie plus réduites, entre 2 et 6 ans, par rapport aux 10 à 12 ans, des fours traditionnels. Pour les fours traditionnels de petites dimensions, jusqu'à 50 tonnes/jour environ, la déperdition de chaleur est relativement élevée, par rapport aux fours de plus grandes dimensions. Dans une fourchette comprise entre 10 à 50 tonnes/jour, le four électrique peut être plus compétitif, en raison des pertes de chaleur plus importantes des fours traditionnels air-combustible.

En se basant sur la pratique courante, on peut proposer les valeurs suivantes, en tant que valeurs indicatives, concernant la taille des fours électriques, pouvant constituer une solution alternative viable. Il existe, bien entendu des exceptions, dues à des conditions locales.

- Les fours en dessous de 75 tonnes par jour sont généralement viables.
- Les fours de capacité comprise entre 75 et 150 peuvent être viables, à certaines conditions.
- Les fours de capacité supérieure à 150 tonnes /jour, ne sont généralement pas viables.

Les considérations d'ordre financier peuvent être également affectées par des facteurs spécifiques à l'installation, entre autres par le prix de l'énergie, la qualité requise, l'espace disponible, le coût des techniques alternatives de réduction, la législation en vigueur, la facilité de fonctionnement et la durée de vie prévue des fours, retenus comme solution alternative.

Dans certains Etats Membres, où la différence de prix entre les combustibles fossiles et l'électricité est très importante, le choix de la fusion électrique sera sûrement moins intéressant. Dans ce cas, les opérateurs pourraient être amenés à choisir un ensemble d'autres techniques, plutôt que la fusion électrique.

### **Applicabilité**

La fusion électrique est applicable à de nombreux secteurs de l'industrie du verre et elle est largement utilisée dans la production de fibres céramiques, de laine minérale, des verres spéciaux, de la gobeletterie et, en moindre mesure, de verre d'emballage. Ce type de fusion ne peut être mis en place que lors de la réfection du four. Nous ne disposons d'aucun exemple concret de fusion électrique, dans le secteur du verre plat et des frites. Cette technique est habituellement utilisée pour la production de compositions de verre, potentiellement très volatiles et polluantes, entre autres le cristal au plomb 24% et l'opale, ainsi que pour des produits à haute valeur ajoutée.

Une plus large utilisation de cette technique est limitée, à cause de son coût d'exploitation, et par une série de considérations d'ordre technique, comme indiqué plus haut. La principale contrainte est le coût d'exploitation, qui, en raison de multiples facteurs, limite la viabilité économique de cette technique. Le fait qu'elle soit viable ne signifie pas forcément qu'elle représente une MTD, pour certaines applications.

Au moment de la rédaction du présent document, cette technique n'est pas utilisée, pour une grande partie de la production du verre, >300 tonnes par jour, et ne peut donc pas être considérée comme entièrement confirmée, d'un point de vue technique et économique.

Les fibres de verre, à fil continu, sont produites à partir de verre E, peu chargé en sodium, d'où une très faible conductivité électrique. La production de verre E, avec une fusion 100 % électrique, n'est pas considérée comme techniquement et économiquement viable, à l'heure actuelle.

Une chaîne de production expérimentale, de verre float, équipée de four électrique, est actuellement en fonctionnement au Royaume Uni. Cette installation a été construite pour démontrer le principe de la fusion électrique, avec couverture de composition, pour la production de verre float. Cette expérience pilote a eu des résultats tout à fait positifs, et cette installation a été utilisée pour produire toute une série de verres spéciaux, dont les émissions auraient été très difficiles à contrôler, avec un four traditionnel. Cette expérience a également

montré qu'il n'est pas actuellement viable, d'un point de vue technique et économique, de gérer une vraie chaîne de production de verre float, >500 tonnes par jour, équipée de fours électriques, en raison des coûts d'exploitation élevés, des structures limitées et de la courte durée de vie de ce type de four.

### Considérations annexes

Les émissions, directement générées par le four, sont extrêmement réduites, par l'application de cette technique, tandis que le rendement thermique est très élevé. Toutefois, si l'on considère les performances environnementales globales, l'impact de la génération d'électricité, sur l'environnement, peut annuler certains avantages. Une analyse entièrement quantitative est impossible, dans le cadre du présent document. Les questions relatives à l'environnement, liées à la génération d'électricité, sont très complexes, et présentent d'importantes différences entre les Etats Membres, et parfois, d'une installation à une autre.

L'électricité peut être fournie par le réseau public, par des installations locales ou spécifiques. Ce qui peut influencer, à la fois sur le coût et sur l'efficacité du service. Si l'électricité est fournie par le réseau public, les sources peuvent être très variées. La génération d'électricité, à partir du charbon, du pétrole, du gaz, des centrales nucléaires, des centrales hydrauliques et d'autres sources renouvelables, provoque des problèmes environnementaux associés à chaque source.

La différence de rendement thermique, entre la fusion électrique et celle alimentée par combustible fossile, est également réduite, si on prend en considération la génération d'électricité. Cela dépend, encore une fois, de la source de l'énergie électrique. Mais, pour une installation traditionnelle, alimentée au combustible fossile, le rendement entre le combustible primaire et le point de consommation de l'électricité, se situe autour de 30 à 35 %. Pour une installation à cycle combiné, équipée de turbine à gaz, le chiffre approche de 50 %.

En raison des faibles volumes de résidus gazeux, produits par cette technique, les coûts des équipements de réduction en aval sont extrêmement limités, et les faibles volumes de poussières collectées peuvent être immédiatement recyclés. Les faibles pertes volatiles réduisent également la consommation de matières premières. Ce qui fait baisser, à la fois, le niveau des émissions et les coûts. Ceci représente un important avantage, pour certains composants particulièrement coûteux et/ou toxiques, tels que les oxydes de plomb, les fluorures, les composés de l'arsenic, le borax, etc.

Généralement, la fusion électrique produit un verre très homogène, de toute première qualité. Ce qui peut constituer un argument en faveur de la fusion électrique, pour certains types de fabrication de verres spéciaux et de gobeletterie.

Généralement, on estime, dans le secteur de la fabrication du verre, que le nitrate de sodium ou le nitrate de potassium, sont nécessaires dans les fours électriques, à couverture de composition, pour créer les conditions d'oxydation nécessaires à assurer un procédé de fabrication stable, sûr et efficace. L'emploi de nitrates a une influence directe sur les émissions de NOx et, bien que cela ne soit pas nécessaire pour toutes les applications, cela peut limiter certains des avantages de la fusion électrique, pour l'environnement. L'utilisation de nitrates, en tant qu'agents oxydants, devient plus importante, en cas de recyclage de déchets, contenant des composés organiques, dans le four. L'emploi de grosses quantités de calcin, provenant de sources extérieures, ou d'autres déchets recyclés, peut parfois générer de mauvaises odeurs.

<u>Avantages</u>
------------------

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Très faible niveau d'émissions directes.</li></ul> |
|--|

- Augmentation potentielle du taux de rendement de la fusion par m<sup>2</sup> de surface du four.
- Amélioration directe de la consommation d'énergie.
- Dans certains cas, diminution du coût des matières premières
- Dans beaucoup de cas, la fusion électrique offre une meilleure qualité de verre, plus homogène
- Des investissements et un encombrement réduits
- Une plus grande facilité de fonctionnement.

#### Inconvénients

- Coûts d'exploitation élevés.
- Durée de vie réduite.
- Non viable d'un point de vue technique et économique, pour la production à grande échelle.
- Moins flexible et non adaptée à d'importantes variations de tirage, pour les verres de première qualité.
- Implications annexes de la génération d'énergie électrique.

**Tableau 4.1 : Principaux avantages et inconvénients de la fusion électrique**

#### **Exemples d'Installations**

Schott Glas, Mainz, Allemagne – verres spéciaux.

Pilkington Glass Technology, St Helens. RU – verre plat , Expérimental/Spécialisé.

Thermal Ceramics, Merseyside, RU – fibres céramiques.

British Gypsum Isover, Runcorn. RU – laine de verre

Saint-Gobain Desjonqueres, Mers-les-Bains, France – verre d'emballage.

### **4.3 Techniques de manutention des matières premières**

La diversité de l'industrie du verre donne lieu à l'utilisation d'un grand nombre de matières premières, dont une grande partie sont des composés solides inorganiques, des minéraux que l'on trouve dans la nature ou des substances, produites de façon industrielle. Elles peuvent être grossièrement broyées ou finement réduites en poudre. Des liquides et, dans une plus petite quantité, des gaz, peuvent également être employés, dans la fabrication du verre. Les techniques généralement utilisées, pour la manutention des matières premières, sont illustrées au Chapitre 2, Paragraphe 2.1. La manutention des matières premières ne provoque pas de problèmes majeurs, spécifiques à la fabrication du verre, en ce qui concerne les émissions atmosphériques. Par conséquent, nous avons résumé, dans ce paragraphe uniquement les techniques qui sont considérées comme de bonnes pratiques, dans la manipulation de ce type de matières.

Les matières poudreuses en vrac sont généralement stockées dans des silos, et les émissions peuvent être réduites, en utilisant des silos fermés, reliés à des systèmes adaptés de réduction des poussières, comme des filtres en tissu. Lorsque cela est possible, les matières collectées peuvent être réintroduites dans les silos, ou recyclées dans le four. Lorsque la quantité de matières premières utilisée ne nécessite pas l'utilisation de silos, les matières les plus fines peuvent être stockées, dans des conteneurs fermés, ou des sacs scellés. Des piles de stockage de matières poudreuses peuvent être conservées à l'abri, pour éviter que les émissions de poussières soient transportées par le vent. Lorsque les poussières constituent un problème majeur, certaines installations peuvent nécessiter l'intervention de véhicules, pour le nettoyage des rues ou la mise en place de systèmes d'humidification.

Lorsque les matières premières sont transportées par des convoyeurs surélevés, il faut prévoir un système de protection contre le vent, afin d'éviter des pertes importantes de produits. Ces systèmes peuvent être conçus de façon à fermer les convoyeurs, sur tous les côtés. Si on utilise des convoyeurs pneumatiques, il faudra prévoir un système complètement fermé, équipé de filtre, pour pouvoir nettoyer l'air, avant de l'émettre. Afin de réduire l'émission de poussières, pendant le transport et l'entraînement par la vapeur de fines particules, à la sortie du four, on

peut maintenir une certaine proportion d'eau, dans la composition, généralement de 0 à 4 %, Dans certains procédés, comme la production de verre au borosilicate, on utilise une composition de matières sèches, ce qui augmente le risque d'émission de poussières et demande une attention accrue dans la manutention.

Une zone dans laquelle il y a habituellement des poussières, c'est la zone de chargement du four. Les principales techniques de contrôle des émissions, dans cette zone sont :

- L'humidification de la composition.
- Une pression légèrement négative, à l'intérieur du four, applicable en tant qu'élément propre au fonctionnement.
- L'aspiration reliée à un système de filtrage, courante dans les fours à couverture de composition.
- Des alimentateurs à vis fermés.
- La fermeture des poches de remplissage, un système de refroidissement peut être nécessaire.

Les émissions de poussières peuvent se produire directement dans l'atmosphère, ou bien à l'intérieur des locaux de fabrication. Dans ce dernier cas, les poussières peuvent s'accumuler à l'intérieur du bâtiment, provoquant des fuites d'émission dues aux courants d'air, allant de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. Les zones potentiellement très chargées en poussières, comme les ateliers de composition, peuvent être conçues avec un minimum d'ouvertures vers l'extérieur, ou bien équipées de rideaux à poussières. Dans les bâtiments où se trouvent les fours, il faut souvent prévoir un certain niveau de refroidissement naturel. Des bouches d'aération ont été prévues à cet effet. Il faut également assurer un niveau de propreté satisfaisant, ainsi que le bon fonctionnement des dispositifs de contrôle des poussières, aspiration, fermetures, etc.

Les zones de fabrication, qui peuvent provoquer des poussières, zones d'ouverture des sacs de mélange des matières premières, d'élimination des poussières collectées dans les filtres, etc., peuvent être équipées de systèmes d'aspiration, reliés à des dispositifs de réduction. Ceci peut être particulièrement important pour les petites installations, qui nécessitent un niveau élevé de manutention manuelle. Toutes ces techniques sont d'autant plus importantes lorsqu'on est amené à manipuler et stocker des matières premières toxiques, comme l'oxyde de plomb et les composés à base de fluorine.

Les matières premières volatiles peuvent être stockées, de façon à minimiser les émissions atmosphériques. Généralement, les températures de stockage en vrac, doivent rester aussi basses que possible et les variations de températures, dues au réchauffement solaire, etc., doivent être prises en compte. Pour les matières qui ont une importante pression de vapeur, ou qui émettent des odeurs, des techniques spécifiques pourraient être nécessaires, afin de réduire les émissions générées, le suintement des réservoirs, ou le déplacement de vapeur, pendant le transport des liquides.

Parmi les techniques appropriées, pour réduire les fuites des réservoirs à pression atmosphérique figurent :

- La peinture du réservoir, avec un vernis à faible absorption des rayons solaires.
- Le contrôle de la température.
- L'isolation du réservoir.
- La gestion du stock.
- Les réservoirs à toit flottant.
- Les systèmes de transfert de la vapeur.
- Les réservoirs à membrane en caoutchouc.
- Les soupapes de pression/vidange, pour les réservoirs conçus pour supporter des variations de pression.



- Le traitement spécifique des émissions par l'adsorption, l'absorption et la condensation.
- bouche-porage.

## 4.4 Techniques de contrôle des émissions atmosphériques générées par la fusion

### 4.4.1 Particules

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm30 Poussières]

Dans le cadre du présent document, le terme particules, indique toutes les matières solides, au point de mesure, pour les émissions générées par la fusion. Il est synonyme de poussières. Ces deux termes sont utilisés de façon interchangeable, tout au long de ce chapitre. Le terme "quantité totale de particules", indique les matières solides, organiques et inorganiques, sans limite minimum de taille, les gouttelettes et les aérosols. La température, au point de mesure, est particulièrement importante, pour les fondoirs à verre. Car certaines matières premières qui provoquent la formation de poussières, notamment les borates, peuvent être volatiles, à des températures relativement basses. Par ailleurs, la nature des poussières, produites par ces procédés, rend difficile une mesure précise.

Le type d'émission de poussières, générées par les fondoirs à verre, varie selon les procédés. Mais dépend essentiellement du type de four et de fonctionnement, ainsi que de la composition du verre. Les trois principales sources de poussières, provenant de la fusion sont :

- L'entraînement par la vapeur des matières premières présentes dans la composition.
- la volatilisation et la réaction des substances, présentes dans la composition et dans la fusion
- Les impuretés des métaux, contenus dans les combustibles.

Pour les fours, alimentés au combustible fossile, la volatilisation et la réaction/condensation des matières premières volatiles, émises par la surface chaude du verre, représentent la plus grande partie de la quantité totale de poussières émises. Généralement, de 80 à 95 % des émissions de poussières sont générées de cette façon. Il faut donc s'assurer que les matières volatiles ont été condensées, avant de traiter ou de mesurer les résidus gazeux. Ceci ne constitue pas un problème, pour le sulfate de sodium, point de fusion 888°C, mais cela l'est, en revanche, pour les gaz contenant du borate.

L'entraînement par la vapeur, des matières premières, contenues dans la composition, représente généralement environ 5 %, des émissions totales d'un four moderne, correctement géré. Ces émissions de poussières sont donc les matières premières, présentes dans la composition et, en particulier, les plus légères d'entre elles.

Les impuretés métalliques, contenues dans les combustibles, vanadium et nickel, contribuent à accroître les émissions de poussières, mais à des niveaux généralement inférieurs à 5 % du total. Ces impuretés sont principalement contenues dans le fioul, d'où pourrait également provenir une certaine quantité de carbonate de sodium. Les impuretés métalliques sont également contenues dans le calcin et dans d'autres matières premières.

Le mécanisme de volatilisation et de formation des particules n'est pas encore entièrement expliqué, pour la fabrication du verre. Environ 90 % de tout le verre, produit dans l'UE, est représenté par du verre sodocalcique, et la plupart des données concernant ce type de fabrication. Les poussières, générées par les fours de production de verre sodocalcique, sont principalement constituées de sulfate de sodium. Jusqu'à 98 % des poussières sont composées de matières solubles, dont 80 à 90 % de sulfate de sodium. Le reste dépend de la composition spécifique du verre. Mais il s'agit essentiellement de sulfates, comme le  $K_2SO_4$ . La partie insoluble contient principalement du silice, et de petites quantités de métaux, entre autres Al. Fe

et Cr. En cas d'utilisation de calcin, provenant de sources externes, les poussières pourront contenir d'autres composants, par exemple du plomb. Le diamètre des particules se situe généralement autour de 0,02 à 1 µm. Mais les petites particules s'agrègent pour en former de plus grosses. On peut distinguer un certain nombre de procédés de volatilisation, qui seront traités au Paragraphe 4.4.1.1 ci-dessous.

Pour les verres, dont la composition contient des quantités considérables de bore, par exemple les fibres de verre à fil continu, la laine de verre et le verre au borosilicate, les borates constituent une grande partie des émissions de poussières. Le rapport entre sulfate de sodium et borates, dans les poussières, dépend de la composition du verre. Dans les formules à faible contenu d'alcalis, par exemple le verre E et la laine de verre, les composés à base de borate, représentent plus de 85 % des émissions totales de poussières. Le reste est constitué de sulfates, de silice et de composés, en fonction des composants secondaires, et des impuretés, présents dans la composition.

Dans le verre au plomb, pour téléviseurs et cristal au plomb, la volatilisation de celui-ci génère de l'oxyde de plomb, ou parfois des condensations de sulfate de plomb.

Dans les fours électriques, à couverture de composition, l'émission de poussières est beaucoup plus faible et provient essentiellement du transport des matières premières de la composition. L'absence d'atmosphère de combustion, à haute température, empêche la formation de particules par volatilisation réactive. Dans les cubilots à vent chaud, utilisés pour la laine de roche, les émissions de poussières, contiennent à la fois des poussières provenant des matières premières, des produits de la combustion et des composés volatiles condensés, générés par la fusion.

Les émissions atmosphériques de métaux, provenant de la fabrication du verre, sont largement constituées de particules. Pour cette raison, les métaux ne sont pas traités séparément dans ce chapitre, mais seulement par rapport aux émissions de poussières. Si nécessaire, nous faisons référence à d'autres paragraphes. Toutefois, dans certains cas, il peut y avoir un volume significatif d'émissions gazeuses de métaux, par exemple du sélénium, provenant du bronze ou de verre décoloré, et du plomb, généré par le cristal au plomb 24%, ou par la fabrication de verres spéciaux.

Les métaux proviennent principalement des impuretés, présentes dans les matières premières, ainsi que des métaux, présents dans les matières premières/additifs, utilisés pour conférer des propriétés particulières, par exemple des oxydes de plomb et des colorants/décolorants, dans le calcin et dans les combustibles. Le calcin, provenant de sources extérieures, est à l'origine d'un certain volume de pollution métallique, surtout en ce qui concerne le plomb, dans certains cas >400 ppm, mais aussi d'autres métaux, par exemple le mercure, lorsque le calcin contient des déchets de tubes d'éclairage, avec vapeurs de mercure. Des données concernant les volumes des émissions métalliques figurent dans les paragraphes par secteur, au Chapitre 3 et au Tableau 3.3.

Les trois principales approches, utilisées pour contrôler les émissions métalliques, dans les poussières ou dans les composants gazeux, sont :

1. La sélection des matières premières, afin de minimiser la contamination et, si possible, d'utiliser d'autres additifs. La sélection des matières premières inclut l'approvisionnement externe et le tri du calcin.
2. Les techniques de réduction des poussières, surtout les filtres à manches et les précipitateurs électrostatiques. Si les émissions contiennent des concentrations de métaux significatives, des systèmes de réduction des poussières, à haut rendement, peuvent porter le niveau des émissions à moins de 5 mg/Nm<sup>3</sup>.
3. Les émissions gazeuses de métaux, par exemple le sélénium, peuvent être substantiellement réduites, par l'utilisation de techniques de polissage à sec, ou par voie demi-sèche, associées à la réduction des poussières, cf. Paragraphe 4.4.3.3.

Dans certains cas, spécialement en Allemagne, la réduction des émissions métalliques a été l'un des facteurs décisifs, pour l'installation de systèmes de réduction des poussières, associés à des systèmes de polissage à sec, ou par voie demi-sèche.

#### 4.4.1.1 Techniques Primaires

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm30 Poussières]

Un fondoir à verre est un environnement extrêmement dynamique et toute modification des conditions chimiques ou d'exploitation peut se répercuter sur le procédé de fusion et sur les autres émissions. C'est la raison pour laquelle il faut considérer toutes les techniques primaires, décrites dans ce document, comme un tout et non pas comme des méthodes individuelles. Toutefois, pour plus de clarté, les différentes techniques ont été décrites séparément, tout en traitant, si possible, des effets liés à chacune d'entre elles.

Pour réduire le niveau des émissions, produites par le transport des particules des matières premières, il convient de maintenir un certain niveau d'humidification à l'intérieur de la composition, et de contrôler régulièrement la couverture, la taille des particules, la vitesse du gaz et le positionnement des brûleurs. Pour les procédés qui emploient des matières premières sèches et/ou très fines, les valeurs peuvent être légèrement plus élevées. Toutefois, ces émissions représenteront toujours une petite part des émissions globales, par rapport aux composés volatiles. Les problèmes liés aux émissions, générées par le chargement des matières dans le four, sont traités au Paragraphe 4.3 ci-dessus.

Les émissions de poussières proviennent principalement des composés volatiles. En traitant des techniques primaires de réduction, nous nous sommes concentrés sur cette source. A partir de cette analyse des poussières, produites par les fours sodocalciques, on peut conclure que les composés du sodium constituent les principaux composants des poussières qui se forment dans les gaz de combustion. Les substances volatiles, contenues dans la composition, par exemple NaCl, et dans la fusion, NaOH, réagissent avec les oxydes de soufre, pour former du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , qui se condense dans les résidus gazeux, en dessous de 1 100°C. Dans la plupart des cas, le sulfate de sodium est utilisé comme agent affinant. La dissociation du sulfate de sodium, dans le verre fondu, provoque des concentrations d'oxyde de soufre, bien plus élevées que les concentrations de composés du sodium, présentes dans la chambre de combustion, et dans les gaz de combustion. Les oxydes de soufre, provenant de la combustion du combustible, ou des sulfates contenus dans la composition, sont présents, dans une quantité stœchiométrique, bien supérieure à celle du sodium volatilisé, qui constitue le paramètre essentiel, pour la formation des poussières. Le sodium provient principalement du calcin ou du carbonate de sodium, et le sodium contenu dans le sulfate de sodium ne constitue pas un facteur important.

Dans des gaz peu chargés en soufre, il peut y avoir une formation de particules de chlorure de sodium, de fluorure de sodium ou de carbonate de sodium, pendant le refroidissement des gaz de combustion, à moins de 900°C. Ce phénomène est assez rare, et se produit généralement lorsqu'on utilise du gaz naturel et lorsque le sulfate de sodium est remplacé par un autre agent affinant, comme l'antimoine. Ce qui n'est jamais le cas dans la production de verre plat ou de verre d'emballage, mais plutôt dans certaines applications spéciales.

On peut distinguer des procédés de volatilisation différents, dans la fabrication du verre sodocalcique :

- (a) La volatilisation réactive, à partir de la surface du verre fondu. L'oxyde de sodium dans la fusion du silicate réagit à la surface avec la vapeur d'eau :  $\text{Na}_2\text{O}$ , fusion, +  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$
- (g) Ce type de volatilisation est potentiellement la principale source d'émission de poussières, dans les fours pour la fabrication de verre sodocalcique.

- (b) La volatilisation de NaCl, présente en tant qu'impureté, dans la soude synthétique. Cette volatilisation génère non seulement des poussières de sulfate de sodium, mais aussi du HCl.
- (c) La volatilisation du sulfate de sodium, à partir de la surface du verre fondu.
- (d) La volatilisation réactive, par réaction chimique, de la surface de la couverture, avec les composants, contenus dans l'atmosphère du four. La vapeur d'eau qui se forme dans la chambre de combustion est considérée comme importante, pour la réaction du carbonate de sodium, en vue de la formation de vapeurs d'hydroxyde de sodium, des réactions similaires ayant lieu pour les composés du potassium :  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH(g)} + \text{CO}_2$ .
- (e) La volatilisation des composants des matières premières, à partir de la surface de la couverture de la composition, sable, feldspath, calcaire, carbonate de sodium, dolomite et sulfate de sodium, est généralement très faible. La pression de la vapeur a lieu très en dessous de 1200°C et au-dessus de 1000°C. Les différents composants ont déjà réagi pour former des silicates.
- (f) La volatilisation des composés du sodium, sous la forme de bulles de gaz, pendant le procédé d'affinage, a également une importance secondaire.
- (g) En cas de recyclage de calcin externe, fabrication de verre d'emballage, des émissions de composés du plomb, PbO, PbCO<sub>3</sub>, PbSO<sub>4</sub>, peuvent se produire, en raison de la présence de fragments de verre au plomb, de glaces et de produits polluants métalliques, à base de plomb.

La situation est différente, pour les autres types de verre. Pour les verres à faible contenu d'alcalis et de bore, le verre E et la laine de verre entre autres, la volatilisation réactive semble être la source principale d'émission de particules. Les poussières émises sont composées, en grande partie, de produits de la réaction de l'acide métaborique, avec le sodium et le potassium. L'acide métaborique, qui provient de la réaction de l'acide borique, avec la vapeur d'eau - B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (l) + H<sub>2</sub>O → 2HBO<sub>2</sub>(g). La formation de poussières par volatilisation a lieu très rapidement, pour les verres chargés en bore, et la concentration d'émissions non réduites est généralement supérieure à celle des verres sodocalciques, parfois jusqu'à dix fois plus.

Les mécanismes de volatilisation, décrits pour le verre sodocalcique, sont à la base de la volatilisation, dans la plupart des autres procédés de fabrication du verre. Mais il peut y avoir des différences, en fonction de la composition chimique.

Les facteurs les plus importants, qui influent sur la volatilisation, sont la température, le taux de vapeur d'eau présent dans l'atmosphère du four, ainsi que la vitesse des gaz, à la surface de la fusion. La disponibilité d'éléments réactifs est également importante. Notamment en ce qui concerne le sodium et les sulfates, contenus dans le verre sodocalcique, et le bore contenu dans le verre au bore. Toutefois, ce facteur est parfois limité par la composition chimique du verre. Les principales mesures primaires, susceptibles de réduire les émissions de poussières, sont les suivantes.

### Modification des matières premières

Le chlorure de sodium peut constituer un facteur important, dans les émissions de poussières et de chlorures. Il est utilisé en tant qu'agent affinant, pour certains verres spéciaux. Mais il est le plus souvent présent sous la forme d'impuretés, dans le carbonate de sodium, fabriqué selon le procédé Solvay. Ces dernières années, les producteurs de verre ont obtenu, des fabricants de carbonate de sodium, une baisse du taux de NaCl, actuellement autour de 1 kg/tonne. Une autre réduction significative à brève échéance entraînerait une transformation ultérieure et, partant, une augmentation du prix. On trouve, à l'état naturel, du carbonate de soude pratiquement sans

NaCl. Mais cette substance est généralement plus chère dans l'UE, en raison des taxes et du coût du transport, à partir des pays d'origine.

Dans la plupart des fours les plus modernes, les niveaux de sulfates ont été réduits au minimum nécessaire, pour obtenir un bon affinage, et maintenir un niveau d'oxydation du verre satisfaisant. Les solutions alternatives, à l'emploi du sulfate de sodium. Comme les agents d'affinage, à base d'arsenic et d'antimoine, peuvent poser un problème environnemental encore plus grave. D'autres progrès, dans ce domaine, ne devraient pas réduire, de façon importante, les émissions. En effet, on estime que le principal obstacle à une réduction ultérieure est constitué par les vapeurs de sodium, alors que pour les fours alimentés au gaz, des concentrations très faibles de sulfate, limiteraient la réaction, dans la phase gazeuse.

Dans les verres à base de bore, celui-ci est essentiel pour le formage des produits et leurs caractéristiques. Les taux de bore ont été réduits de manière importante, ces dernières années. Mais on peut difficilement aller plus loin, dans cette voie, sans affecter le rendement, la consommation d'énergie, et la qualité des produits. Les matières premières, à base de bore, sont relativement coûteuses, et tous les efforts sont mis en œuvre, pour en réduire la consommation. Au moment de la rédaction du présent document, aucune alternative viable au bore, n'a été trouvée, ce qui a amené de nombreux fabricants à installer des systèmes de réduction secondaires, surtout pour la laine de verre et le verre au borosilicate. Généralement, les poussières, provenant de la réduction, sont recyclées dans le four.

De nombreux fabricants de fibres de verre ont développé des compositions contenant de faibles quantités de bore et de fluorine, ou avec seulement quelques traces de ces substances, dans les matières premières. Des émissions inférieures à 50 mg/m<sup>3</sup> ont été constatées, qui prouvent le rôle du bore dans la formation des poussières. Ce type de verre, qui requiert une température de fusion plus élevée, est plus difficile à fibrer et ses effets sur la durée de vie des matériaux réfractaires, doit encore être définie. Les spécifications de cette technique, extrêmement prometteuse, étant protégées par des droits de propriété intellectuelle, on ne peut pas considérer qu'elle soit entièrement disponible pour le moment. Les progrès varient d'une entreprise à l'autre. Mais de nombreuses formules de ce type sont actuellement commercialisables.

### **Réduction de la température à la surface de la fusion**

La température, sur la voûte du four, constitue un élément important, dans la formation des particules. Car des températures élevées provoquent la formation d'un plus gros volume de particules volatiles. Le rapport entre la température, sur la voûte du four, et la formation de particules, a été montré, pour les fours destinés à la production de verre sodocalcique. La réduction de la température du four se répercute sur la qualité du produit et le rendement du four. Les mesures les plus efficaces, pour la réduction des poussières, par tonne de verre, sont également celles qui améliorent le rendement énergétique et, en particulier, le transfert de chaleur au verre, en permettant de baisser la température sur la voûte. Les principaux points sont les suivants :

- La structure et la géométrie du four, afin d'améliorer les courants de convection et le transfert de chaleur. Ces modifications ne peuvent être effectuées que lors de la réfection du four. Les fours de plus grandes dimensions ont généralement un rendement énergétique supérieur, permettant un plus faible taux d'émission, par tonne de verre
- Le boosting électrique contribue à faire baisser les températures, sur la voûte, en concentrant l'énergie directement dans la fusion et en améliorant les courants de convection. Le positionnement des électrodes est important. Mais il ne peut être modifié que lors de la réfection du four. L'utilisation du boosting électrique est généralement limitée par le coût de l'électricité.

- L'utilisation accrue du calcin réduit la quantité d'énergie nécessaire, pour la fusion, permettant un fonctionnement à plus basse température, et une consommation de combustible plus faible. De plus, le calcin déjà fondu, contribue à faire baisser le niveau de certains composants volatiles et réactifs, qui provoquent la formation de poussières, comme le chlorure de sodium et les sulfates. Dans les fours au fioul, l'emploi du calcin aide à réduire la quantité de combustible nécessaire et, partant, le taux de SO<sub>2</sub>. L'emploi du calcin est limité par la disponibilité de calcin de la qualité et composition requise. Par exemple, les fours pour verre d'emballage utilisent de 5 à 95 % de calcin, de source interne et externe, tandis que le taux, pour les fours pour gobeletterie, sodocalcique, et verre plat varie entre 10 et 40 %, généralement du calcin recyclé en interne uniquement, et que les fours pour fibres de verre en utilisent que très rarement.

### Positionnement des brûleurs

Un autre facteur important, du taux de volatilisation, est la vitesse de remplacement des gaz, au-dessus de la fusion. Une vitesse élevée ou un niveau important de turbulence, à la surface de la fusion, augmentent la vitesse de volatilisation. Des progrès ont été réalisés, par le biais du positionnement des brûleurs, afin d'optimiser la vitesse et la direction de l'air de combustion, ainsi que celles du combustible. Ces changements ont également été associés à une modification de la largeur du four et de la longueur de la partie non fondue de la couverture de composition. Les modifications, entraînant un changement de la structure du four, ne peuvent être réalisées que lors de la phase de réfection. Tandis que d'autres changements sont parfois plus efficaces, s'ils sont associés à une nouvelle conception de la structure.

### Passage de l'alimentation au fioul à celle au gaz, ou au fioul très peu chargé en soufre

Le passage de l'alimentation au fioul à celle au gaz naturel peut donner lieu à une réduction substantielle des émissions de poussières. Cela est probablement dû à des réactions de condensation particulières des particules, avec l'alimentation au gaz, et dans certains cas, à la réduction du taux de SO<sub>x</sub>. Dans le secteur de production du verre plat, par exemple, on a constaté une réduction des émissions de poussières de plus de 25 %, avec le remplacement de l'alimentation au fioul par celle au gaz. Dans ce même secteur, on a également constaté un effet significatif, dû à la réduction du pourcentage de soufre dans le fioul, réduction des poussières de 20 mg/Nm<sup>3</sup> pour une réduction de 1 % du pourcentage de soufre dans le fioul. Un effet similaire a été constaté dans la gobeletterie, avec un fioul peu chargé en soufre, <1 %. Le passage à l'alimentation au gaz naturel est traité de façon plus détaillée au Paragraphe 4.4.3.1. Les principaux points sont synthétisés comme suit :

- La majorité des installations sont maintenant équipées pour pouvoir utiliser l'un ou l'autre de ces deux combustibles. Mais certaines ne sont pas alimentées en gaz naturel.
- Le coût de cette technique dépend, en grande partie, des prix des combustibles.
- Le transfert de chaleur, à la fusion, pourrait être inférieur à celui obtenu avec une alimentation au fioul, en raison d'une plus faible luminosité de la flamme.
- L'alimentation au gaz naturel peut provoquer des émissions plus importantes de Nox.
- Dans certains cas, la combustion mixte, qui utilise simultanément les deux combustibles dans le même four, peut donner un compromis intéressant entre ces deux techniques de fusion, faible taux de Nox, SO<sub>x</sub> et d'émission de poussières.

### Autres considérations

Les émissions, provenant des couvertures froides des fours électriques, peuvent être minimisées, par la réduction du flux d'air et de la turbulence, pendant la phase de chargement, et par l'optimisation de la taille des grains des matières premières et de l'humidification. Les méthodes de réduction primaire sont rarement mises en place, pour les émissions de poussières des cubilots, de laine de roche. Dans ce cas, il est préférable de laver les matières premières, pour



éliminer les poussières. Toutefois, la plupart des cubilots sont équipés de filtres à manches, ce qui n'encourage guère les opérateurs à adopter des mesures primaires, qui ne modifieraient en rien l'exigence d'adopter des mesures secondaires.

### **Performances environnementales des techniques primaires**

Les niveaux d'émission, qu'on peut obtenir par l'application de techniques primaires, sont difficiles à quantifier, en raison d'une série de facteurs pouvant affecter les résultats, ainsi que de la variété des types de fours et de compositions.

Pour les fours à flammes, les niveaux d'émission les plus faibles qu'on puisse obtenir, par l'application de techniques de réduction primaires, sont réalisés par les fours de production de verre sodocalcique. Les émissions massiques moyennes se situent autour de 0,4 kg/tonne de verre fondu, et la plupart des concentrations sont comprises entre 100 et 300 mg/m<sup>3</sup>. Certains fours obtiennent des niveaux inférieurs à 100 mg/m<sup>3</sup>, pour les émissions de poussières. Mais cela est rare.

Le secteur de production du verre sodocalcique a établi que, par l'optimisation des techniques primaires, basée sur les connaissances actuelles et sur les améliorations prévues, une valeur comprise entre 70 et 100 mg/m<sup>3</sup>, d'émission de poussières, pourrait être tout à fait réaliste, dans un futur proche[tm30 Poussières]. Actuellement, les usines ayant des émissions inférieures à 100 mg/Nm<sup>3</sup>, sans réduction secondaire, sont rares et une valeur de 100 et 200 mg/Nm<sup>3</sup>, ≤ 0,4 kg/tonne de verre, est considérée comme réalisable, avec des mesures primaires. Toutefois, ces valeurs semblent pouvoir être obtenues uniquement pour la production de verre sodocalcique. En général, pour les autres types de verre, l'optimisation des techniques primaires pourrait réduire les émissions de 10 à 30 %.

### **Considérations d'ordre financier**

Peu de données sont disponibles, sur le coût des techniques primaires. Mais, selon les entreprises du secteur, le coût des mesures mises en application à ce jour, serait relativement bas. Les techniques, visant à réduire la consommation d'énergie, peuvent permettre des économies des coûts de revient. Le coût des installations au gaz est traité au Paragraphe 4.4.3.1.

Les mesures primaires peuvent avoir des coûts différents, en fonction du niveau et de l'échelle de temps de l'application. Les mesures constituent un ensemble et c'est justement l'optimisation de cet ensemble qui détermine les coûts et les résultats. Par exemple, l'emploi de carbonate de sodium naturel, ou peu chargé en chlorure, n'est pas susceptible de réduire les émissions de poussières, à des niveaux comparables à ceux des mesures secondaires, et en raison aussi d'autres facteurs, les coûts pourraient être disproportionnés, par rapport aux avantages. Toutefois, il s'agit là de l'un des aspects de l'ensemble de mesures, pour lesquels on doit évaluer les coûts et les résultats, globalement.

### **Applicabilité**

Les principes décrits sont considérés comme applicables en général, à tous les secteurs de l'industrie du verre, dans les limites indiquées. Toutefois, les techniques qui ont donné des résultats satisfaisants, dans une installation peuvent ne pas avoir les mêmes effets, dans d'autres. A court et moyen terme, les mesures primaires, pour la réduction des poussières, devraient donner des résultats plus encourageants pour le verre sodocalcique que pour les autres types de verre.

### **Considérations annexes**

<u>Avantages</u>
------------------

- Faible coût.
- L'accent est mis sur la prévention plutôt que sur la réduction.
- Cela n'entraîne pas la consommation d'énergie ou les déchets solides associés aux techniques secondaires.

### Inconvénients :

- Les mesures primaires ne permettent pas d'obtenir les niveaux d'émission liés aux techniques secondaires, telles que les précipitateurs électrostatiques. Cela ne devrait pas changer dans un futur proche
- Les mesures primaires imposent des contraintes ultérieures d'exploitation, lors de la fabrication.

**Tableau 4.2 : Principaux avantages et inconvénients des techniques primaires, pour la réduction des poussières**

### 4.4.1.2 Précipitateurs électrostatiques

#### Description de la technique

Le précipitateur électrostatique, PE, peut fonctionner à des conditions de température, de pression et de concentration de particules, très différentes. Il n'est pas particulièrement sensible à la taille des particules, et peut les collecter, à la fois dans une atmosphère sèche ou humide. Le PE est composé d'un certain nombre d'électrodes d'ionisation, haute tension, et des électrodes collectrices correspondantes. Les particules sont chargées et ensuite séparées, du flux de gaz, sous l'influence du champ électrique, généré entre les électrodes. Le champ électrique est appliqué, entre les électrodes, par un petit courant direct haute tension, jusqu'à 80 kV. Le PE est réparti, concrètement, en une série de zones distinctes, on peut utiliser jusqu'à 5 champs.

Les particules sont extraites du flux gazeux en quatre étapes :

- application d'une charge électrique aux particules.
- migration des particules, à l'intérieur du champ électrique.
- capture des particules, sur l'électrode collectrice.
- élimination des particules, de la surface de l'électrode.

Les électrodes d'ionisation doivent être ébranlées ou soumises à vibration, pour prévenir la formation de particules, et leur résistance mécanique doit être compatible avec la transmission de la vibration ou de l'ébranlage. La fiabilité mécanique des électrodes d'ionisation et de leur support, est importante. Car un seul fil brisé peut court-circuiter tout un champ électrique du précipitateur. Dans les précipitateurs, par voie humide, les particules collectées sont éliminées des plaques du collecteur, par vaporisation intermittente ou continue, avec un liquide adapté, normalement de l'eau.

Les performances des PE suivent la formule hollandaise, qui met en rapport le rendement de l'extraction des poussières, avec la surface totale des électrodes collectrices, le débit volumétrique des gaz et la vitesse de migration des particules. Pour une matière donnée, les deux paramètres les plus importants sont la maximisation de la surface des électrodes collectrices, et le temps de séjour dans les champs électriques. Par ailleurs, la tension à appliquer est d'autant plus élevée que la distance entre les électrodes collectrices est importante. Cette distance dépend de la structure du précipitateur.

Un redresseur est bien conçu lorsqu'il utilise des sections séparées, pour chaque zone ou partie de zone, du PE. Ceci permet de varier la tension appliquée, dans les zones d'entrée et de sortie, afin de tenir compte de la charge réduite des particules vers la sortie, tout en permettant de faire fonctionner les différentes zones à des tensions de plus en plus élevées. Un redresseur correctement conçu doit également avoir un système de contrôle automatique, afin d'assurer

l'application de la tension maximum optimale, HT, aux électrodes. Une alimentation HT fixe n'est pas susceptible de fournir un captage optimal des particules.

La résistivité, l'inverse de la conductivité, des particules est très importante. Si elle est trop basse, les particules, qui atteignent l'électrode collectrice, perdent facilement leur charge, et peuvent être remises en circulation. Si la résistivité est trop élevée, une couche isolante se forme sur l'électrode, en empêchant l'effluve normal et en réduisant ainsi le captage. La plupart des particules, rencontrées dans la fabrication du verre, ont une résistivité comprise dans des valeurs acceptables. Toutefois, si nécessaire, le captage des particules peut être amélioré, en conditionnant les particules. Dans ce cas on peut utiliser de l'ammoniaque et du trioxyde de soufre. Mais cela n'est généralement pas nécessaire, dans la production du verre. La résistivité peut être réduite, en diminuant la température du gaz, ou en l'humidifiant.

Afin d'obtenir les meilleurs résultats, d'un précipitateur, le flux gazeux, qui passe à travers l'appareil, doit être uniforme et aucun gaz ne doit contourner le champ électrique. Une prise d'air bien conçue et l'utilisation de dispositifs de distribution du flux, à l'intérieur du tuyau d'entrée, aident à obtenir un flux uniforme, à l'entrée du précipitateur. Généralement, la température de fonctionnement doit être inférieure à 430°C. Le rendement d'un PE diminue dans le temps. Les électrodes peuvent casser, ne plus être alignées ou s'écailler, et une révision périodique est nécessaire, surtout pour les équipements les plus anciens.

Dans des applications où le flux gazeux peut contenir des quantités significatives de gaz acides, notamment Sox, HCl et HF, il faut effectuer un polissage des gaz acides, avant d'utiliser le PE. Il s'agit généralement d'un polissage à sec, ou par voie demi-sèche, par l'application d'hydroxyde de calcium, de carbonate de sodium ou de bicarbonate de sodium. Ces techniques sont traitées au paragraphe 4.4.3. Les gaz acides sont générés par les matières premières et la combustion du fioul. Sans polissage préalable des gaz acides, le PE peut subir une importante corrosion. Dans certains verres au bore, les alcalis peuvent également contribuer à la précipitation des composés, volatiles du bore. Lorsque le flux gazeux ne contient pas d'importantes quantités de gaz acides, alimentation au gaz et les matières premières sont peu chargées en soufre, le pré-traitement peut se révéler superflu, par exemple dans la plupart des procédés de fabrication de laine minérale.

### **Performances environnementales**

Les PE sont très efficaces, pour collecter des poussières, de dimensions comprises entre 0.1 µm et 10 µm, le pouvoir d'arrêt global étant de 95 à 99 %, en fonction de la concentration à l'entrée et des dimensions du PE. Les performances effectives varient, en fonction des caractéristiques des résidus gazeux, et de la structure du PE. Mais on peut obtenir des concentrations comprises entre 5 et 50 mg/m<sup>3</sup>. Bien que le nombre de champs électriques appliqués constitue un facteur important. Les performances environnementales ne dépendent pas seulement de cela. Un PE à deux étages, d'un certain type, peut se révéler aussi efficace qu'un PE à trois étages, de type différent, ou utilisé dans une autre application. Le choix dépendra donc du niveau de performance requis.

Dans la plupart des applications, un PE moderne, bien conçu, à deux ou trois étages, doit pouvoir atteindre des niveaux de 20 mg/m<sup>3</sup> et inférieurs à 0,1 kg de poussières, par tonne de verre fondu. Dans l'industrie du verre, presque tous les exemples de PE, sont à deux étages, et peuvent atteindre les valeurs indiquées. Dans certaines applications, les PE peuvent même atteindre des valeurs inférieures, en raison de conditions particulièrement favorables, ou parce qu'on utilise des modèles spécifiquement conçus à cet effet. Les niveaux d'émission, pour les PE, peuvent parfois être inférieures à 10 mg/Nm<sup>3</sup>. Toutefois, sauf en présence de conditions très favorables, des performances aussi élevées, ont des coûts plus importants que ceux indiqués dans ce paragraphe.

Des installations équipées de plusieurs fours peuvent utiliser un seul PE.

### **Considérations d'ordre financier**

Les principaux facteurs qui influent sur le prix des PE sont :

- le volume des résidus gazeux.
- le rendement requis.
- le nombre de champs.
- le conditionnement des résidus gazeux.
- la nécessité d'un polissage des gaz acides.
- le coût d'élimination des poussières, si elles ne peuvent être recyclées.

Chaque champ électrique supplémentaire, au-delà de deux, augmente l'investissement d'environ 15 à 20 %.

Le tableau ci-dessous montre l'investissement et les coûts d'exploitation indicatifs, pour les PE, pour différentes tailles de fours, et différents flux d'air, avec polissage des gaz acides. Les chiffres donnés peuvent varier de plus ou moins 15 %, pour les investissements et de 30 %, pour le coût d'exploitation, en fonction d'un certain nombre de facteurs, spécifiques à l'installation. Le coût d'exploitation inclut le polissage des gaz acides, mais pas les intérêts et la dépréciation. Pour les installations qui ne nécessitent pas de polissage, l'investissement sera environ de 30 % inférieur, et le coût d'exploitation de 30 à 40 % inférieur. Des modifications, apportées à la structure des fours existants, peuvent générer des frais supplémentaires, généralement de 5 à 20 %.

Taille tonnes/jour	Volume de gaz Nm <sup>3</sup> /heure	Investissement (x 1000) en euros	Coût d'exploitation (x 1 000) en euros par an
50 t/j verre d'emballage	6 400	565	37
100 t/j verre d'emballage	11 120	875	53
300 t/j verre d'emballage	23 000	1 420	89
450 t/j verre d'emballage	33 350	1 820	116
600 t/j verre float	70 000	2 750	186
100 t/j fibres de verre	-	-	64

**Tableau 4.3 : Coût des précipitateurs électrostatiques, avec polissage des gaz acides [tm32 Beerkens]**

Les coûts d'infrastructure varient en fonction des dimensions du PE et des conditions locales de chaque installation. Comme mentionné plus haut, les PE peuvent être relativement grands et des travaux sont parfois nécessaires, pour les intégrer à des installations déjà existantes.

### Applicabilité

En principe, ce type d'équipement est applicable à tous les types d'installations, nouveaux et déjà existants. Les coûts pourraient être plus élevés, pour les installations anciennes, surtout s'il y a des restrictions d'espace. Toutefois, pour les fours électriques et les fours traditionnels, de petites dimensions, inférieurs à 200 tonnes/jour, l'importance de l'investissement peut amener parfois les opérateurs à choisir des techniques alternatives, notamment les filtres à manches. Les PE ne sont pas utilisés avec des cubilots à vent chaud, pour laine de roche, en raison du risque d'explosion, lié au monoxyde de carbone.

Il existe de nombreux exemples d'applications, ayant donné des résultats positifs, notamment en Allemagne, où environ 80 fours sont équipés de PE, avec polissage des gaz acides. Lorsque les réglementations des états membres ont demandé aux grandes installations de production de verre, de se conformer aux limites en matière d'émission de poussières, par l'application d'une réduction secondaire, le PE a été le type d'équipement le plus fréquemment choisi.

## Considérations annexes

L'emploi de cette technique entraîne une augmentation de la consommation d'énergie, qui reste, toutefois, limitée par rapport à la consommation d'énergie du four, moins de 1 %, 1 à 3 % du coût de l'énergie. Un effet secondaire sur l'environnement va se produire au point de génération de l'électricité, qui dépendra de la source de l'électricité.

Dans un grand nombre d'applications, il sera nécessaire d'éliminer les gaz acides, avant d'effectuer le traitement. On effectue, pour ce faire, un polissage à sec, ou par voie demi-sèche, qui provoque un flux de déchets solides, jusqu'à dix fois supérieur à la quantité de poussières réduite. Lorsque ces déchets peuvent être recyclés dans le four, cela provoque une réduction globale de la consommation de matières premières, dans le cas contraire, il faudra éliminer ces déchets.

Les poussières collectées peuvent être recyclées, dans la plupart des cas et, selon le type de sorbant choisi, ces déchets peuvent remplacer une partie des matières premières, notamment le sulfate de sodium, et dans certains cas, le fluorure et les matières chargées en plomb. On peut rencontrer des problèmes, dans le secteur du verre d'emballage, où le niveau de sulfates requis pour un verre réduit, surtout en présence de grandes quantités de calcin, est très faible. Cela peut limiter la possibilité de recyclage des poussières, en particulier si on utilise du fioul très chargé en soufre, et une partie des poussières collectées devra être éliminée en dehors du site. Dans un certain nombre de secteurs, la capacité de recyclage des poussières collectées, peut être limitée par des contraintes liées à la qualité du produit et aux propriétés chimiques du verre, par exemple dans le domaine optique.

Au moment de la rédaction du présent document, le coût d'élimination des poussières, qui ne peuvent être recyclées, est souvent supérieur à celui des combustibles, peu chargés en soufre, fioul domestique ou gaz naturel, entre autres. Par conséquent, dans de nombreux cas, surtout dans la production de verre d'emballage, le fabricant préférera changer de combustible plutôt que de créer une masse de déchets solides à éliminer. Toutefois, l'importante différence de prix entre le combustible, peu chargé en soufre, notamment le gaz naturel, et les autres combustibles, rend ce choix moins intéressant, d'un point de vue financier.

L'un des objectifs essentiels, de lavage des gaz acides, est de conditionner le gaz, qui doit être traité par le PE. Cela peut également provoquer de plus faibles émissions de gaz acides. Si les poussières sont recyclées, certains gaz acides sont ré-émis. Toutefois, un équilibre dynamique va se créer, dans lequel l'absorption globale, dans le verre, sera supérieure et les émissions inférieures.

Dans l'industrie du verre, la plupart des particules émises sont générées par la volatilisation réactive. Il est, donc, important de faire en sorte que le flux gazeux soit à une température inférieure à celle de formation des particules. Dans les fours régénératifs, la température des résidus gazeux, se situe en moyenne autour de 400°C, et le refroidissement n'est pas nécessaire, en général, pour condenser les composés volatiles, ou pour atteindre les limites de fonctionnement du PE. Dans les fours à récupération, la température des résidus gazeux est de 800°C environ, et le refroidissement est nécessaire, pour réaliser les deux opérations susmentionnées. Pour les verres au borate, la laine de verre par exemple, on doit parfois réduire la température du gaz, en dessous de 200°C, avant d'effectuer la réduction, tandis que la condensation requise et le risque de corrosion associé, sont minimisés dans le système. La température des résidus gazeux, des fours oxycombustion est généralement >1000°C, ce qui requiert un important refroidissement.

### Avantages :

- Fort rendement d'extraction des poussières.
- Les poussières collectées peuvent être généralement réutilisées.

- Faible chute de pression, par rapport aux filtres à manches, et faibles coûts d'exploitation.
- Peut faire partie d'un système intégré de traitement, par exemple avec dépoussiéreurs et SCR.
- Les PE ne se bloquent pas facilement, suite à une charge excessive ou au contenu d'humidité ; ce qui est le cas, parfois, avec les filtres en tissu.
- En général, non seulement dans l'industrie du verre, ils fonctionnent mieux à des températures élevées, que les filtres à manches
- Peuvent être conçus pour permettre l'intégration ultérieure d'autres champs électriques

### Inconvénients :

- Consommation d'énergie. Bien qu'elle soit faible par rapport à celle du four, <1 %, le coût est plus élevé car il s'agit d'électricité.
- la masse de déchets solides générée, qu'on ne peut pas toujours recycler.
- De nombreux procédés nécessitent un polissage des gaz acides et, dans ces cas, un absorbant est nécessaire.
- Les PE peuvent nécessiter des investissements plus lourds que d'autres systèmes.
- Le fonctionnement doit être maintenu dans les limites fixées par le constructeur, sous peine d'une baisse des performances.
- Il faut respecter les précautions de sécurité, pour l'utilisation d'équipements haute tension
- Les PE peuvent être très encombrants

**Tableau 4.4 : Principaux avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques**

### **4.4.1.3 Filtres à manches**

#### **Description de la technique**

Des systèmes, équipés de filtres à manches, sont utilisés dans de nombreuses applications, dans l'industrie du verre, en raison de leur efficacité, dans le traitement des particules fines, provenant des matières premières. Toutefois, en raison de leur tendance à s'obstruer, dans certains cas, ils ne sont pas toujours adoptés, dans toutes les applications. Il existe de nombreuses solutions, pour résoudre ces problèmes. Mais elles peuvent être coûteuses.

Le principe de base des filtres en tissu consiste à choisir une membrane perméable au gaz, mais capable de retenir les poussières. Initialement, les poussières se déposent à la fois sur la surface des fibres et à l'intérieur du tissu en profondeur. Mais au fur et à mesure que la couche superficielle se forme, elle devient elle-même le moyen de filtrage principal. Au fur et à mesure que la couche de poussières s'épaissit, la résistance au flux gazeux augmente et un nettoyage périodique du filtre est nécessaire, pour pouvoir contrôler la chute de pression sur le filtre. Le flux gazeux peut aller de l'intérieur du filtre vers l'extérieur ou vice-versa.

Parmi les techniques de nettoyage, les plus courantes, figurent le courant d'air inversé, le secouage mécanique, la vibration et l'émission d'air comprimé. Souvent on utilise plusieurs méthodes à la fois. Les méthodes de nettoyage courantes ne restituent pas au filtre son état initial. Il n'est pas conseillé de trop nettoyer le tissu. Car les particules déposées, dans la trame du tissu, aident à réduire la taille des porosités entre les fibres, en permettant d'obtenir un rendement très élevé.

Les filtres en tissu sont conçus sur la base d'une vitesse de filtrage prévue, qui est définie comme étant la vitesse maximale admissible du gaz circulant à travers une zone de tissu, exprimée en m/s. La vitesse de filtrage se situe généralement entre 0,01 et 0,06 m/s, en fonction de l'application, du type de filtre et du tissu. La conception du filtre doit optimiser l'équilibre entre la chute de pression, coût d'exploitation, et la taille, investissement. Si la vitesse de filtrage est trop élevée, la chute de pression sera importante et les particules pénétreront dans le tissu en le rendant opaque. Si la vitesse de filtrage est trop faible, le filtre sera efficace, mais très coûteux.



Les particules, présentes dans les résidus gazeux, en aval des fours à réservoir, pour la production du verre, ayant tendance à adhérer au tissu du filtre, il est souvent difficile d'éliminer les particules du tissu en les nettoyant. La tendance des particules à s'agréger peut favoriser un bon fonctionnement du four en continu, par le recyclage constant d'un flux partiel de particules, provenant du tissu du filtre, dans les résidus gazeux.

Dans le choix du tissu, on doit tenir compte de la composition des gaz, de la nature et de la taille des particules de poussière, de la méthode de nettoyage utilisée, du rendement requis et des aspects économiques de la question. La température du gaz doit également être prise en compte, ainsi que la technique de refroidissement, s'il y a lieu, et la vapeur d'eau qui en résulte, ainsi que le point de rosée de l'acide. Parmi les caractéristiques du tissu, à prendre en considération, figurent la résistance chimique, la structure des fibres et le type de fil, le tissage, l'apprêt du tissu, l'abrasion et la résistance aux craquelures, par flexion, le pouvoir d'arrêt, les finitions et la perméabilité du tissu.

La température du gaz doit absolument être maintenue, dans les valeurs prévues, pour les filtres à manches. Le gaz doit être conservé, au-dessus du point de rosée, de toutes les substances condensables présentes, par exemple eau et  $H_2SO_4$ , et en dessous de la limite supérieure de température du dispositif de filtrage. Si la température est trop basse, il y a condensation. Ce qui peut provoquer l'obstruction du filtre. Si la température, en revanche, est trop élevée, le tissu du filtre peut être endommagé et nécessiter un remplacement coûteux. Les tissus des filtres traditionnels ont généralement une température maximum de fonctionnement comprise entre 130°C et 220°C et, en général, le coût est d'autant plus élevé que la température de fonctionnement est élevée. Dans la plupart des installations au gaz, la température des résidus gazeux est comprise entre 450 et 800°C. Par conséquent, le gaz doit être refroidi, avant d'être filtré, par dilution, trempe ou échangeur thermique.

Lorsque les gaz de combustion sont susceptibles de contenir des substances acides, notamment dans les fours au fioul, il faudra installer un dispositif d'épuration en amont du filtre, afin de prévenir la condensation des acides, qui pourrait endommager les manches et le logement du filtre. Il n'est pas recommandé d'utiliser du fioul contenant plus de 1 % de soufre. En ce qui concerne les gaz de combustion, chargés en bore, le dispositif d'épuration aide à précipiter les substances volatiles, contenant du bore, et peut faciliter l'arrêt des poussières sans blocage.

### **Performances environnementales**

Les filtres à manches sont des dispositifs très efficaces d'arrêt des poussières, dont le rendement se situe généralement autour de 95 à 99 %. Des niveaux démissions de particules de l'ordre de 0,1 mg/m<sup>3</sup> à 5 mg/m<sup>3</sup>, peuvent être obtenus et des taux inférieurs à 10 mg/m<sup>3</sup> peuvent être prévus, dans la plupart des applications. Ceci correspond généralement à beaucoup moins de 0,1 kg par tonne de verre fondu. La possibilité d'atteindre des niveaux de cet ordre peut être importante, lorsque les poussières contiennent un pourcentage significatif de métaux, et qu'on souhaite limiter leurs émissions.

### **Considérations d'ordre financier**

L'investissement est souvent moins élevé que pour les précipitateurs électrostatiques, tandis que le coût d'exploitation est plus élevé. Toutefois, la concurrence étant de plus en plus acharnée, dans le secteur des équipements de réduction, le prix des filtres à manches commence à se rapprocher de celui des PE, surtout pour de gros volumes de gaz. Les différences, d'investissement et de coûts d'exploitation, rentrent généralement dans l'ordre des valeurs indiquées pour les PE, au Paragraphe 4.4.1.2. Il s'agit d'une évaluation cas par cas. Mais souvent les plus petites installations préfèrent des filtres à manches, en raison de leur investissement plus modeste, et des coûts proportionnellement réduits, pour de faibles flux d'air.

Un exemple spécifique figure dans [tm32 Beerkens], pour une installation de production de verre float, d'une capacité de 550 à 600 t/jour, avec un volume de gaz de combustion de 65 000 m<sup>3</sup>/heure. L'investissement pour un filtre et un système de polissage, par voie semi-sèche est d'environ 3 millions d'euros, avec un coût d'exploitation, hors intérêts et dépréciation, de 0,5 millions d'euros. Ces chiffres prennent comme hypothèse un recyclage complet des poussières. Pour un four de fabrication de verre d'emballage, avec 20 000 m<sup>3</sup> de gaz de combustion, l'investissement pour un filtre et un système de polissage, par voie semi-sèche, approche les 1,5 millions d'euros.

### Applicabilité

En principe, les filtres à manches peuvent être utilisés, avec tous les types de fours, neufs ou déjà existants. Toutefois, dans de nombreux secteurs, cette technique n'a pas été adoptée, en raison du niveau de maintenance que cela requiert et des risques d'obstruction du tissu, dont le remplacement du dispositif de filtrage est coûteux. Dans les systèmes plus modernes, ces problèmes ont été résolus, et des filtres à manches fonctionnent de manière efficace, dans des installations de production de verre d'emballage, de verre au borosilicate et dans une seule installation de fabrication de verre float. En ajoutant un dispositif de polissage et en utilisant des combustibles, peu chargés en soufre, le risque d'obstruction des filtres est moindre.

Le blocage du filtre, dû à l'obstruction du tissu, se produit souvent dans les fours de production de laine de verre, et d'autres verres au bore, alimentés au combustible fossile, en raison de la nature collante des particules, qui rend nécessaire l'épuration, pour éviter les blocages. Les fours sont généralement alimentés au gaz avec de faibles concentrations d'acide, par conséquent, avec un précipitateur électrostatique, il n'est pas nécessaire d'installer un dispositif d'épuration. Ceci réduit l'investissement et le coût d'exploitation et facilite le recyclage des poussières.

Les filtres à manches posent un autre problème sur la plupart des fours à combustible fossile qui nécessitent un contrôle précis de la pression, car la présence d'un filtre en tissu, avec une chute importante de pression, peut rendre ce contrôle plus difficile.

Les filtres à manche sont largement adoptés, dans un grand nombre de secteurs, de l'industrie du verre, surtout pour les volumes de gaz moins importants. Cette technique est largement utilisée avec les fours électriques, les cubilots pour laine de roche, les fours à frites et pour fibres céramiques. Dans certains fours, à combustible fossile, de plus petites dimensions, les filtres ont été choisis en tant que technique à associer aux systèmes de polissage qui ont été installés pour réduire les émissions de gaz acides. De plus, pour les installations de petites dimensions, le fait que l'investissement, pour les filtres, soit moins important que pour les précipitateurs, constitue un argument de choix, qui compense les frais générés par la manutention et le risque d'obstruction des manches.

### Considérations annexes

Lorsque la technique est associée à un dispositif d'épuration, cela génère une masse de déchets solides qui doit être éliminée ou recyclée. L'épuration peut également provoquer de plus faibles émissions de gaz acides, cf. Paragraphes 4.4.3.3 et 4.4.4.2. Si les poussières sont recyclées, certains gaz acides sont réémis. Toutefois, un équilibre dynamique va se créer, dans lequel l'absorption globale, dans le verre, sera supérieure et les émissions inférieures.

Le rendement des systèmes d'épuration, peut être plus élevé, avec les filtres à manches, qu'avec les PE. Car une absorption ultérieure peut se produire, sur la couche de poussières qui recouvre le filtre.

En raison de leurs basses températures de fonctionnement, les systèmes avec filtres à manches, ne sont généralement pas les meilleures solutions avec les systèmes SCR. Car les résidus gazeux vont devoir être à nouveau réchauffés à 350°C, pour obtenir le meilleur rendement.

L'un des problèmes, posés par les filtres à manche, est leur coût élevé de remplacement, en cas d'obstruction ou d'endommagement. Bien que, normalement, leur durée de vie soit relativement longue, 2 à 4 ans. Ces types de problèmes peuvent se produire, quoique rarement, en entraînant des frais, qui ne sont pas associés, en revanche, à l'utilisation des précipitateurs électrostatiques.

Les filtres en tissu sont des équipements délicats, qui requièrent un procédé technique bien développé, et un système de contrôle électronique continu fiable, afin de prévenir tout dommage.

Lorsque les filtres à manche sont endommagés, le niveau des émissions peut être relativement élevé. Il est donc important de mettre en place un système de détection de la rupture des filtres, par une surveillance constante des poussières.

#### Avantages

- Pouvoir d'arrêt élevé.
- Captage des produits en atmosphère sèche.
- Faible investissement pour les applications les plus simples.

#### Inconvénients

- masse de déchets solides générée si le recyclage n'est pas possible
- consommation d'énergie due à la chute de pression.
- le refroidissement du gaz est souvent nécessaire.
- conditionnement du tissu parfois nécessaire.
- tissus coûteux parfois nécessaires.
- encombrement souvent élevé
- problèmes de point de rosée pouvant provoquer l'obstruction des tissus.
- de l'air de nettoyage, courant inversé, est souvent nécessaire.
- certaines poussières difficiles à déplacer provoquent une chute de pression excessive
- les manches doivent être remplacés périodiquement

**Tableau 4.5 : Principaux avantages et inconvénients des filtres à manches**

#### **4.4.1.4 Collecteurs mécaniques**

Ce terme est utilisé pour désigner des techniques utilisant des forces mécaniques, gravité, inertie, centrifuge, pour séparer les poussières du flux gazeux :

- Cyclones – ils impriment un mouvement de rotation au gaz, et les poussières sont séparées par la force centrifuge
- Décanteurs par gravité – le gaz entre dans une vaste chambre dans laquelle la vitesse du gaz est réduite et les poussières sont séparées
- Dépoussiéreurs de dérivation – les dérivation changent la direction du flux gazeux et les poussières sont ainsi séparées
- Volets – des séries de petites dérivation séparent le flux gazeux et en changeant la direction en extrayant les poussières.

Ces techniques offrent un pouvoir d'arrêt limité, pour les petites particules, et sont donc rarement utilisées, la taille des particules, qu'on rencontre dans la fabrication du verre étant relativement petite. L'exception est constituée par le cyclone, qu'on trouve dans certaines applications, surtout dans la phase de prétraitement, pour l'application d'autres techniques. Le principe de fonctionnement, ainsi que les principaux avantages et inconvénients, sont résumés ci-dessous. Toutefois, les cyclones n'étant pas considérés comme une technique efficace, leur fonctionnement n'est pas décrit ici de façon détaillée.

Le cyclone est un dispositif de nettoyage à gaz inerte. Les poussières sont séparées du flux gazeux, lorsque la direction de ce dernier est modifiée, les poussières continuent à circuler dans la direction initiale, en vertu de l'inertie, avant d'être déposées sur la surface de captage. Il existe deux types de cyclones, à courant inversé et direct. Les cyclones à courant inversé sont les plus courants et sont composés d'une enveloppe cylindrique, munie d'une base conique, une trémie de captage des poussières, ainsi que des orifices d'entrée et de sortie de l'air. Il y a deux types principaux de cyclones, à courant d'air inversé, tangential et axial. Cette classification est le résultat de la géométrie de l'entrée d'air.

Le flux gazeux, en entrée, et canalisé vers un tourbillon, et la force centripète maintient le mouvement circulaire. Les particules, au-dessus d'une certaine taille, sont expulsées de la spirale d'entrée, vers un canal circulaire, plus large, et se déposent sur les parois du cyclone. Le courant d'air guide les poussières vers la trémie de captage et, à la base du cône, le flux d'air est inversé, le flux gazeux est inversé et le gaz propre passe à nouveau, à travers le centre du cyclone, dans la spirale de sortie.

Généralement, le rendement d'un cyclone augmente au fur et à mesure qu'augmentent la densité des particules, la vitesse d'entrée, la longueur du cyclone, le nombre de révolutions des gaz, le rapport entre le diamètre du corps et celui de la sortie, le diamètre des particules, la quantité de poussières et la régularité des parois du cyclone. Le rendement diminue au fur et à mesure qu'augmentent la viscosité du gaz, la densité du gaz, la température, le diamètre du cyclone, le diamètre de sortie du gaz, la largeur du tuyau d'entrée du gaz et la zone d'entrée.

Les cyclones sont largement employés, dans de nombreux secteurs industriels, et sont particulièrement adaptés pour le captage des poussières, d'un diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ . Selon la structure, des cyclones dotés d'un rendement moyen/élevé, offrent un pouvoir d'arrêt compris entre 45 et 90 %, à 10  $\mu\text{m}$ , et entre 5 et 30 %, à 1  $\mu\text{m}$ . Il sont souvent préférés à des technologies plus onéreuses, pour extraire des flux gazeux des particules de plus grosses dimensions, en réduisant ainsi la quantité de poussières, entrant dans les équipements de réduction principaux.

### Avantages :

- Investissement et coût d'exploitation limités, y compris la maintenance.
- Chute de pression réduite.
- Faible encombrement, par rapport à d'autres techniques.
- Peut fonctionner avec de grosses quantités de poussières
- Peut être utilisé avec une variété de gaz et de poussières.
- Peut fonctionner à des températures et des pressions élevées.
- fabrication possible avec un vaste choix de matériaux.

### Inconvénients :

- Faible pouvoir d'arrêt des petites particules.
- Les matières légères ou pointues sont difficiles à éliminer.
- Le point de rosée peut provoquer des blocages.
- La décompression des matières inflammables est difficile
- Problèmes avec les poussières abrasives.

**Tableau 4.6 : Principaux avantages et inconvénients des cyclones**

### **4.4.1.5 Dispositifs de filtrage haute température**

L'un des problèmes posés par les filtres à manches traditionnels est la nécessité de maintenir la température des résidus gazeux, dans les limites de température du filtre. Lorsque la température dépasse la limite maximale prévue, le filtre doit être contourné ou refroidi, par exemple par dilution. La limite de température maximale des matériaux, des filtres traditionnels est de

120 à 180°C, certains matériaux pouvant aller jusqu'à 250°C, fibre de verre. Le coût des matériaux augmente de manière significative, pour ceux qui peuvent fonctionner au-dessus de 180°C. Dans certaines applications, des filtres haute température ont été utilisés. Mais il ne s'agit pas de filtres à manches traditionnels, et ils ressemblent plutôt à des filtres à bougies.

Les filtres haute température ont été utilisés, avec des résultats positifs, pour toutes les émissions générées par les cubilots, pour la production de laine de roche. Mais ils ne sont plus utilisés, en raison de leur coût. Les filtres haute température, les plus courants, qui sont utilisés dans d'autres branches de l'industrie, sont les filtres en céramique. Aucune application de ce type de technique n'a été signalée, dans l'industrie du verre, et nous ne disposons donc pas de données comparatives, relatives aux coûts et aux performances environnementales. Jusqu'ici, ces filtres ont été employés dans des secteurs qui engendrent des volumes d'émissions gazeuses, inférieurs à ceux générés par la plupart des fondoirs à verre.

#### **4.4.1.6 Dépoussiéreurs par voie humide**

Les systèmes de dépoussiérage, par voie humide, peuvent être utilisés pour contrôler, à la fois, les émissions gazeuses et celles de particules. Alors que la technologie, pour ces deux types de déchets est similaire. Les critères de conception, des dispositifs d'élimination des gaz, diffèrent beaucoup de ceux appliqués aux dispositifs d'élimination des particules. Pour des raisons économiques, les systèmes de dépoussiérage, par voie humide, sont souvent utilisés pour contrôler les émissions mixtes de gaz et de particules. Cette structure est forcément composite. Mais elle peut représenter une MTD, lorsque des systèmes de contrôle séparés seraient trop coûteux. Le dépoussiérage par voie humide tend à être bloqué par des particules insolubles, en provoquant la formation de déchets boueux. Cette technique est décrite de façon plus détaillée au Paragraphe 4.5.6.1.2.

Dans certaines applications, on peut employer des dépoussiéreurs munis de venturi. Ces systèmes ont une chute de pression élevée, consomment donc beaucoup d'énergie et ont des coûts d'exploitation élevés. Bien qu'on puisse obtenir de bons résultats, avec ce type de dépoussiéreur, dans certaines applications, ceux-ci ne sont pas viables, d'un point de vue technique et économique, pour la plupart des installations de fabrication de verre, en raison de leurs dimensions. On peut, toutefois, les appliquer à des installations de petite échelle très spécialisées, surtout en présence de résidus gazeux.

Le dépoussiérage par voie humide n'est pas une solution viable, pour la réduction des poussières, pour la majorité des fours.

#### **4.4.1.7 Récapitulatif de l'analyse des techniques indiquées au Paragraphe 4.4.1**

La réduction des émissions de particules, provenant des fondoirs à verre, est considérée comme une question non encore résolue, aussi bien du point de vue technique que financier. Un grand nombre de facteurs jouent un rôle, dans la définition des MTD, applicables pour le dépoussiérage des fours, dont les principaux sont :

- L'impact des poussières sur l'environnement.
- Les techniques de réduction primaires et secondaires, par rapport aux MTD.
- Les économies d'échelle et les considérations relatives aux coûts

#### **Impact des poussières sur l'environnement**

Les aspects importants, relatifs aux émissions de poussières pour l'environnement sont l'émission de poussières en général, le risque d'émission de métaux, lourds, et l'émission de particules fines.

Dans le verre sodocalcique, le principal composant des poussières est le sulfate de sodium, jusqu'à 95 %. Le sulfate de sodium n'est pas considéré comme nocif en soi. Mais, en tant que composant solide, il contribue à l'émission de particules. Ces émissions font l'objet d'une attention accrue, de la part des décideurs, en matière de politique environnementale, notamment en ce qui concerne les particules de dimensions inférieures à 10µm, ce qui est généralement le cas pour les émissions provenant des fondoirs à verre.

De nombreux métaux sont également contenus dans les particules générées par les fours. Les principaux composants, qui suscitent des inquiétudes, sont le sélénium, Se, le plomb, Pb, le chrome, Cr, le cuivre, Cu, le vanadium, V, le nickel, Ni, l'antimoine, Sb, l'arsenic, As, le cadmium, Cd, le zinc, Zn et le manganèse, Mn. Les émissions de ces substances dépendent en grande partie de la quantité et de la qualité du verre recyclé, utilisé dans le procédé, calcin, qu'on utilise ou non du fioul, et de l'adjonction de métaux, à la composition, en tant qu'agents colorants et décolorants. La plupart des ces substances sont chimiquement liées aux particules. Toutefois, surtout en ce qui concerne le sélénium, le cadmium, le plomb et le zinc, les émissions volatiles de ces substances peuvent également être significatives. Dans de nombreux cas, l'argument principal qui a poussé les opérateurs à installer des équipements de réduction a été la nécessité de réduire les émissions de métaux, lourds, volatiles ou contenus dans les poussières. La réduction des émissions gazeuses, SO<sub>2</sub>, HCl etc., a été un deuxième argument dans ce sens.

Un dernier point, à prendre en considération, est le risque d'émission de composants gazeux, sous forme de fumées, qui peuvent être produites surtout par les verres contenant du bore, une partie des composés gazeux du bore pouvant passer à travers les équipements de réduction des poussières, et se condenser après émission dans l'atmosphère.

### **Techniques de réduction primaires et secondaires par rapport aux MTD**

Les techniques de réduction secondaire, les plus courantes dans l'industrie du verre, sont les filtres à manches et les précipitateurs électrostatiques. Ces deux techniques sont largement utilisées, chacune présentant des possibilités et des limites spécifiques. Fin 1998, 30 % environ des fours de production de verre sodocalcique, dans l'UE et 100 % dans certains états membres, étaient équipés de réduction secondaire pour les poussières.

D'autre part, l'application de mesures secondaires a des coûts financiers non négligeables, ainsi qu'un certain impact environnemental. En général, pour les petites installations de production de verre d'emballage et de verre float, l'investissement se situe entre 0,5 et 2,75 millions d'euros, avec des coûts d'exploitation allant de 37 000 à 186 000 euros, par an. Les spécialistes se demandent actuellement si la réduction secondaire est nécessaire, dans tous les cas. Bien entendu, le coût des mesures primaires est bien inférieur à celui des mesures secondaires, sans production de déchets, ni consommation d'énergie. Il s'agit là de trois bonnes raisons de préférer les mesures primaires, et d'encourager leur développement.

L'industrie européenne du verre a beaucoup investi dans l'étude des mécanismes de formation des poussières, et dans le développement de techniques de réduction primaires. Mais l'expérience dans ce domaine est encore insuffisante. Au moment de la rédaction du présent document, seuls quelques fours, de production de verre sodocalcique, présentent des émissions de poussières inférieures à 100 mg/Nm<sup>3</sup>, sans réduction secondaire, et une valeur de 100 à 200 mg/Nm<sup>3</sup>, autour de 0,3 kg/tonne de verre, est actuellement considérée comme réalisable, avec des mesures primaires. On affirme que des émissions de 70 à 100 mg/Nm<sup>3</sup> sont possibles, à moyen terme [tm30 Poussières]. L'avantage relatif, des réductions ultérieures des poussières, doit être considéré dans le contexte global de la protection de l'environnement.

Les aspects positifs des techniques primaires sont relégués au second plan, d'un point de vue technique, par les meilleures performances actuelles des techniques secondaires, < 30 mg/Nm<sup>3</sup> et < 0,1 kg/tonne de verre, par l'impossibilité de réaliser ce type de valeurs, avec des mesures



primaires, dans un futur proche, et d'un point de vue environnemental, par la nécessité de réduire les émissions de poussières, en particulier les particules fines, les composants acides et les métaux lourds.

De plus, l'utilisation exclusive de techniques primaires, pour la réduction des émissions de poussières, peut limiter la flexibilité des conditions d'exploitation du four, en termes de qualité des matières premières chargées, faible taux d'impuretés, fluorures, chlorures, métaux lourds, de type de combustible, peu chargé en soufre et métaux lourds, de modification de la production, verre coloré ou décoloré.

Dans les années à venir l'industrie du verre va explorer et développer le potentiel des mesures primaires de réduction des poussières, émises par les fondoirs à verre. En raison du manque de prévisions fiables, il est impossible d'anticiper les développements dans ce domaine. Par conséquent, la décision relative aux MTD, pour la réduction des émissions de poussières, doit se fonder sur les connaissances actuelles.

### **Economie d'échelle et considérations relatives aux coûts**

La définition de "technique disponible", dans la Directive 96/61/EC, établit qu'une technique doit être développée à une échelle permettant son application, dans le secteur industriel concerné, dans des conditions viables, d'un point de vue technique et économique, en prenant en considération ses coûts et ses avantages et la rendant raisonnablement accessible. Généralement, les techniques de réduction secondaires, dans l'industrie du verre, sont considérées accessibles et viables, d'un point de vue technique et, dans la plupart des cas, économique.

Toutefois, comme pour toutes les mesures secondaires, l'économie d'échelle constitue un facteur important. Cela signifie que pour les fours de petites dimensions, coût par Nm<sup>3</sup> de gaz de combustion traité, le coût est généralement plus élevé que pour les grands fours. Le coût dépend de l'application et, en particulier, du volume de résidus gazeux. Les économies d'échelle doivent être prises en considération, dans la détermination des MTD en général. Hormis les économies d'échelle, les considérations globales de coût, pour le dépoussiérage, devraient inclure les avantages pour l'environnement, élimination des particules fines, des métaux, s'il y a lieu, et de lavage des gaz acides, s'il y a lieu, ainsi que des inconvénients, dus à la formation de déchets, lorsque le recyclage n'est pas possible et à la consommation d'énergie.

#### **4.4.2 Oxydes d'azote NOx**

Le terme oxyde d'azote, NOx, comprend l'oxyde nitrique, NO, et le dioxyde d'azote, NO<sub>2</sub>, exprimé sous forme d'équivalent de NO<sub>2</sub>. L'oxyde nitreux, N<sub>2</sub>O, n'est pas une substance polluante habituelle, dans l'industrie du verre, et n'est pas comprise dans le terme NOx. Les trois principales sources d'émission de Nox, provenant de la fusion du verre, sont les matières premières, le combustible et le Nox thermique. Une quatrième source, le Nox instantané, généré par la réaction de l'azote, par un parcours complexe, avec des radicaux d'hydrocarbures de courte durée, est négligeable.

Lorsque des nitrates sont présents dans la composition, le NOx est émis au moment de la fusion des matières premières. Généralement, la plupart des composants de l'azote sont émis sous forme de Nox, et ne sont pas incorporés dans le verre. Par exemple, lorsque NaNO<sub>3</sub> est fondu, le composant de sodium est incorporé dans le verre, sous forme de Na<sub>2</sub>O, tandis que le reste du composé est émis sous la forme de gaz, Nox, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>.

Le NO de combustion provient de l'oxydation de l'azote et de ses composés, présents dans le combustible. Mais l'apport global est modeste, par rapport à celui de Nox thermique. Dans l'alimentation au gaz naturel, le NO de combustion est inexistant.

En raison des températures élevées, qui se développent à l'intérieur des fours, jusqu'à 1650°C et 2000°C dans les flammes, la source principale de NOx est le NOx thermique, provenant de l'oxydation de l'azote, dans l'atmosphère de combustion, à des températures supérieures à 1300°C. Les principales sources de l'azote sont l'air de combustion, l'air de pulvérisation, dans les fours au fioul et les fuites d'air à l'intérieur du four, la substance prédominante est NO, 90 à 95 %, formé par la réaction de  $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$ . Les niveaux de NO<sub>2</sub> sont extrêmement faibles et la plupart du NO<sub>2</sub> détecté, dans les émissions, est généré par l'oxydation atmosphérique de NO. Les conditions, à l'intérieur du four, sont telles que l'oxyde nitreux, N<sub>2</sub>O, n'est pas détectable dans les émissions.

Dans les fours électriques, le NOx provient uniquement de la décomposition des matières premières. Dans les cubilots, pour la production de laine de roche, il y a partout une atmosphère réductrice et les émissions de NOx sont généralement très faibles. Des émissions peuvent provenir de l'installation de postcombustion, le but de ce système étant d'oxyder le monoxyde de carbone et l'acide sulfhydrique.

Dans les fours à combustibles fossiles, les autres facteurs étant équivalents, les émissions de NOx sont réduites proportionnellement à la consommation de combustible. Par conséquent, les techniques visant à améliorer le rendement énergétique ont de plus faibles émissions de Nox, exprimées en kg NOx/tonne de verre fondu. Toutefois, la concentration des émissions n'est pas toujours réduite, surtout si le volume de gaz résiduel baisse également. La réduction de Nox thermique est le résultat d'un ensemble de facteurs, dont, notamment, des températures et des niveaux d'air de combustion moins élevés. Les techniques, servant à réduire les émissions de Nox, mais principalement utilisées pour réduire la consommation d'énergie, figurent au Paragraphe 4.8, et ne sont pas traitées dans le présent paragraphe.

### 4.4.2.1 Modification de la Combustion

#### Description des techniques

La formation de NOx thermique est décrite, d'un point de vue qualitatif, par la formule ci-dessous. Où *A* et *B* sont des constantes. *T* est la température des flammes et *t* la durée de séjour à la température *T*. Pour les gaz, les rapports se réfèrent aux concentrations.

$$NOx = A \times \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \times N_2 \times (O_2)^{0.5} \times t$$

Les principaux facteurs, qui influent sur la formation de Nox, sont la température des flammes, le taux d'oxygène dans la zone de réaction, et le temps de séjour, dans la zone des flammes, à haute température. Les mesures de contrôle primaires du NOx cherchent à générer les conditions les moins favorables, à la formation de Nox, donc à éviter la présence simultanée d'azote et d'oxygène, à haute température. Les principales techniques adoptées, pour minimiser la quantité de NOx thermique, figurent ci-dessous.

#### Réduction du rapport air/combustible

Les fuites d'air, à l'intérieur du four, en particulier autour des orifices d'aération, et à travers l'alimentateur, peuvent faire augmenter le niveau de NOx. Le bloc du brûleur est relativement facile à sceller et des mesures peuvent être adoptées, pour éviter l'entrée d'air dans la zone de chargement des matières premières. Ces mesures sont relativement économiques et efficaces, la réduction de NOx dépend, naturellement, du niveau initial. Mais elle peut atteindre 10 %.

Généralement, les fours fonctionnent avec un excès d'air de 5 à 10 %, à savoir, de 1 à 2 % d'oxygène excédentaire, afin d'assurer une combustion complète. En réduisant le rapport

air/combustible, pour atteindre des niveaux presque stœchiométriques, on peut réaliser des réductions significatives de Nox, mais également d'importantes économies d'énergie. Afin de mettre en application efficacement cette technique, il convient de surveiller les niveaux effectifs de NO, CO et O<sub>2</sub>, présents dans les émissions gazeuses. Si la combustion reste en dessous des niveaux stœchiométriques, le monoxyde de carbone et l'usure des matériaux réfractaires peuvent augmenter, et le niveau de rédox du verre peut être modifié, affectant ainsi la qualité du verre.

Ce type de modification doit être mis en application progressivement, afin d'éviter d'éventuels problèmes et d'obtenir les meilleurs résultats. Dans certains cas, par exemple les fours à récupération, en analysant la stœchiométrie globale du four, on constate que certains brûleurs brûlent trop de combustible, dans les zones les plus chaudes du four, tandis que d'autres fonctionnent avec trop d'air, dans les parties les plus froides. Globalement, le rapport sera proche de la stœchiométrie. En fonction de la position initiale, ces techniques peuvent permettre de réduire les émissions jusqu'à 40 %.

La quantité d'air, à l'intérieur du four, peut être réduite plus tard, par l'emploi du gaz naturel, de hautes pressions ou de vapeur à la place de l'air, pour la vaporisation de l'huile. Ceci contribue à réduire le niveau d'oxygène, ainsi que les températures maximums des flammes. Les résultats de cette technique sont irréguliers et, dans certains cas, décevants.

### **Réduction de la température de l'air de combustion**

La température des flammes peut être réduite, en réduisant la température de préchauffage de l'air de combustion. Par exemple, les températures de l'air de combustion, dans les fours à récupération, sont nettement inférieures à celles des fours régénératifs, ce qui réduit la température des flammes et les concentrations de NOx. Toutefois, l'abaissement de la température de préchauffage diminue le rendement du four, tirage spécifique diminué, et celui du combustible, en augmentant la consommation de combustible et, potentiellement, le niveau des émissions, kg/tonne de verre, de Nox, CO<sub>2</sub>, d'oxydes de soufre, de particules, etc. Globalement, cette technique semble présenter des avantages limités pour l'environnement.

### **Combustion étagée**

Si le combustible et l'air et oxygène sont injectés au même endroit dans le brûleur, une flamme se produit avec une zone primaire chaude d'oxydation proche de l'ouverture et une zone secondaire plus froide, un peu plus loin. La plus grosse quantité de NOx est produite dans la zone la plus chaude. Donc, en réduisant la proportion d'air ou de combustible, injectée dans le brûleur, la température maximale et la formation de Nox, diminuent également. Le combustible ou l'air restants sont ajoutés plus tard, dans la zone de combustion.

L'injection progressive d'air implique, dans un premier temps, une combustion en dessous de la stœchiométrie et, ensuite, l'adjonction ultérieure d'air ou d'oxygène, dans le four, jusqu'à la combustion complète. Il y a différentes façons d'obtenir une combustion étagée. Les premières expériences d'intégration progressive d'air chaud ont été difficiles. Les techniques d'introduction progressive d'air soufflé, BAS, et d'introduction progressive d'air enrichi à l'oxygène, OEAS, sont actuellement à l'étude aux Etats Unis, par la société Combustion Tec. Environ 10 fours sont équipés de ce système et les résultats annoncés concernent une réduction de NOx de 70 %.

L'introduction progressive du combustible se fonde sur le principe suivant :

Une flamme de gaz, à faible impulsion, environ 10 % de l'énergie totale, se développe dans la gorge du brûleur. Cette flamme secondaire couvrira la base de la flamme primaire, en réduisant le contenu en oxygène de la flamme primaire et sa température à cœur.

Par conséquent, cela réduit la formation de NOx. Cette technique a donné de meilleurs résultats que l'introduction progressive d'air, et elle est assez largement utilisée. Par cette technique, on peut obtenir une réduction des émissions, allant jusqu'à 35 %.

### Recirculation des gaz de combustion

Les résidus gazeux, provenant du four, peuvent être réinjectés, dans la flamme, afin de réduire la quantité d'oxygène et, donc, la température et la formation de NOx. On a rencontré des difficultés, dans l'application de cette technique à grande échelle, dans l'industrie du verre. Et on estime qu'elle n'est plus employée. Au moment de la rédaction du présent document, cette technique n'est pas considérée comme confirmée, d'un point de vue technique, dans cette application.

### Brûleurs à faible taux de NOx

Ce terme désigne toute une série de systèmes de brûleurs, brevetés ou appliqués par certaines entreprises, et conçus pour minimiser la formation de NOx. Le principe de base de ces systèmes peut varier et peut incorporer différentes caractéristiques, parmi celles mentionnées ci-dessus ou ci-dessous. Une réduction des émissions d'environ 30 % peut être réalisée, en utilisant ces techniques. Les systèmes pour fours à gaz diffèrent légèrement de ceux pour fours à fioul. Les principales caractéristiques de ces brûleurs sont :

- Un mélange plus lent d'air et de combustible, pour réduire la température maximale des flammes, formation des flammes.
- Des vitesses d'injection minimales, proportionnelles à la combustion complète.
- Des flammes à plus haute émission, par exemple en favorisant le craquage thermique des combustibles fossiles, pour obtenir une meilleure émission, en diminuant la température des flammes.

### Choix du combustible

Les fours au gaz, dans le secteur du verre, provoquent des émissions de NOx plus élevées que celles des fours à fioul. Par exemple, pour un four de production de verre float moyen, les concentrations de Nox, indiquées au Paragraphe 3.4.2.2, montrent 2500 mg/m<sup>3</sup>, pour le gaz et 1800 mg/m<sup>3</sup>, pour le fioul. Les différences sont importantes, en fonction du type de four, et de l'application. Mais une différence de 25 à 40 % est assez fréquente.

La principale raison de cette différence est que l'émission thermique, des flammes du gaz, est inférieure à celle des flammes du fioul, le gaz nécessitant des températures de flammes plus élevées, pour obtenir le même transfert thermique, dans la fusion, et en favorisant ainsi la formation de NOx. Toutefois, les progrès réalisés dans l'alimentation au gaz et dans la conception des fours, ont permis de réduire l'écart dans les émissions de NOx et dans la consommation de combustible, entre ces deux types de fours. Dans certaines applications, par exemple le verre d'emballage, un rendement du combustible et des émissions de NOx proches de celles générées par le fioul, ont été obtenues avec le gaz, par un réglage approprié des flammes. Le taux d'azote, contenu dans le gaz naturel, est généralement négligeable. Mais il peut varier d'une zone à l'autre, en affectant les émissions de NOx en conséquence.

### Performances environnementales

Les réductions indicatives des émissions, qu'on peut obtenir par l'application de ces techniques, sont fournies dans la description de chacune d'entre elles. Les effets ne sont pas cumulés. Car ces techniques constituent en général différentes façons d'atteindre le même but. Par conséquent, une réduction de 10 %, réalisée avec une certaine technique, ne peut pas être ajoutée tout simplement aux 10 % obtenus, avec une autre technique. Les réductions globales d'émission, pour les systèmes de combustion optimisée, varient largement entre moins de 10 % et plus de 70 %. Pour les fours pour lesquels peu de travail a été réalisé, en appliquant ces techniques, des réductions des émissions de 40 à 60 % peuvent être obtenues, dans la majorité des cas.

Les niveaux d'émission, réalisables avec ces techniques, varient en fonction de la situation initiale, de l'âge et de la structure du four et, en particulier, de la rigueur avec laquelle ces mesures sont appliquées et surveillées. Des mesures relativement simples peuvent donner de très bons résultats, si elles sont appliquées correctement. L'industrie du verre a réalisé des progrès considérables, dans les années 90, et d'importants moyens ont été consacrés à ces travaux.

Les fours régénératifs à boucle génèrent souvent des émissions de NOx inférieures à celles des fours à brûleurs transversaux, cf. Paragraphe 4.2, et les techniques décrites dans ce paragraphe, sont généralement plus efficaces, pour les fours à boucle. Des niveaux d'émission de 700 à 1100 mg/m<sup>3</sup> et de 0,9 à 2 kg/tonne de verre, ont été obtenus, pour les fours à brûleurs transversaux, tandis que pour les fours à boucle, les valeurs sont comprises entre 650 et 800 mg/m<sup>3</sup>, et moins de 1,5 kg/tonne de verre. On a constaté peu de valeurs en dessous de ce niveau, pour certaines applications spécifiques.

Les résultats, relatifs aux fours à récupération, sont plus variés. Mais cela peut être dû à l'emploi plus diversifié de ces fours. Des résultats comparables, ou parfois inférieurs, à ceux des fours régénératifs, ont été obtenus pour les fours à récupération, pour la fabrication de verre d'emballage et de fibres de verre à fil continu. Tandis que des résultats moins encourageants ont été réalisés pour la laine de verre.

### **Considérations d'ordre financier**

Le coût des modifications apportées à la combustion n'est pas excessif, et peut parfois être compensé par la baisse des coûts d'exploitation, due aux économies d'énergie. Les systèmes de brûleurs, à faible taux de Nox, coûtent entre 100 000 et 550 000 euros par four, selon la taille et le type, et il faut ajouter à cela entre 65 000 et 90 000 euros, pour les systèmes de surveillance et de contrôle. Le coût des brûleurs, c'est le coût du remplacement, tandis que les frais supplémentaires, pour les nouveaux fours, ne sont pas élevés. Les systèmes de combustion progressive peuvent être beaucoup plus onéreux.

Ces techniques primaires, associées à l'optimisation de la composition, sont généralement beaucoup plus économiques que les techniques de réduction secondaires. Les coûts comparatifs sont traités au Paragraphe 4.4.2.9.

### **Applicabilité**

En principe, et sous réserve des restrictions susmentionnées, ces techniques s'appliquent à tous les fours traditionnels, à combustible fossile. La plupart des techniques s'appliquent à la fois aux fours déjà existants et aux nouveaux fours. Toutefois, on ne peut profiter entièrement des avantages de certaines techniques, par exemple les brûleurs à faible taux de NOx, que si elles sont associées à une conception et géométrie de four optimales, qu'on ne peut mettre en place que pour les nouveaux fours ou les fours reconstruits.

Le succès obtenu, avec ces techniques, peut également dépendre du degré de compétence de l'opérateur et des moyens scientifiques. L'optimisation des systèmes nécessite une longue période d'expérimentation et de surveillance, ainsi qu'un haut niveau de compétence technique et d'expérience. Les opérateurs qui ne disposent pas de ces moyens peuvent avoir recours aux services de conseils spécialisés, dans la modification et l'optimisation de la combustion. Ce travail de développement vient s'ajouter aux coûts des techniques.

Le degré d'applicabilité des techniques peut également dépendre des exigences liées au produit et au procédé de production. Par exemple, dans certaines installations de production de gobeletterie, les contraintes imposées par la qualité du produit, nécessitent un verre très oxydé et très transparent. Ceci implique un temps de séjour prolongé, des températures plus élevées et l'emploi d'agents oxydants, une série d'éléments qui donnent lieu à de plus importantes

émissions de Nox, en limitant l'emploi de certaines techniques, parmi celles décrites ci-dessus. Cet exemple est traité de façon plus détaillée au Paragraphe 4.4.2.2 ci-dessous.

### Considérations annexes

#### Avantages :

- Coûts relatifs peu élevés.
  - Réductions considérables des émissions de NOx réalisables pour la plupart des fours.
- Applicable aux nouveaux fours et à ceux déjà existants.
- Ces techniques ne comportent aucun effet négatif significatif pour l'environnement et peuvent contribuer à réaliser d'importantes économies d'énergie
  - Des températures de four et une consommation d'énergie moins élevées peuvent également limiter les émissions

#### Inconvénients :

- D'importantes connaissances techniques sont nécessaires pour obtenir de bons résultats.
- La modification de la structure du four peut être nécessaire pour obtenir de meilleurs résultats.
- Il faut éviter les problèmes de qualité dus au changement du rédox.
- Le niveau de CO doit être contrôlé pour éviter d'endommager les matériaux réfractaires.
- Une atmosphère davantage réductrice peut favoriser les émissions de SO<sub>2</sub>.

**Tableau 4.7 : Principaux avantages et inconvénients de la modification de la combustion**

### 4.4.2.2 Composition

Les nitrates sont utilisés en tant qu'agents oxydants et affinants, dans la fabrication du verre. Le nitrate le plus couramment utilisé est celui de sodium. Mais dans certaines applications, pour verres spéciaux, on emploie également le nitrate de potassium ou de baryum. Bien que le nitrate de sodium agisse en tant qu'agent affinant, il est essentiellement utilisé en tant qu'oxydant, alors que le sulfate de sodium est employé comme agent affinant, dans la plupart des applications. Pendant le procédé de fusion, les nitrates se dissocient pour former NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, et O<sub>2</sub>. Le O<sub>2</sub> est employé pour oxyder la fusion, surtout Fe<sup>2+</sup> à Fe<sup>3+</sup>, afin d'obtenir un verre très transparent et d'oxyder les composants organiques, contenus dans la composition.

L'emploi des nitrates varie largement d'un secteur de production du verre à l'autre. Ils sont rarement utilisés pour le verre plat ou le verre d'emballage, sauf pour produire du verre de toute première qualité, très incolore ou, au contraire, très coloré, comme le verre gris ou le verre de bronze. Les nitrates sont employés dans la fabrication de gobeletterie, pour certains produits haut de gamme, nécessitant un niveau de transparence optique très élevé et, donc, un faible contenu en Fe<sup>2+</sup>, mais aussi dans la fabrication de verre pour téléviseurs, de verre au borosilicate, de vitrocéramique et de verre pour l'industrie optique. Les nitrates, en tant qu'agents oxydants, sont également utilisés dans les fours électriques, pour la production de verres très oxydés, ou dans la fusion de matières premières contenant des composés organiques, par exemple les déchets de laine de verre. Globalement, on estime que de 7 à 9 %, de la production de verre de l'UE, nécessite l'emploi de grosses quantités de nitrates.

En moyenne, on compte entre 0,5 et 1 % de nitrate, à savoir, entre 5 et 10 kg de NaNO<sub>3</sub>, pour 1 tonne de verre. Pour certains procédés, comme la production de verre pour téléviseurs, le pourcentage peut atteindre 4 % ou plus. Pendant la fusion, les principales émissions de gaz sont celles de NO et de O<sub>2</sub>, le niveau de N<sub>2</sub> et NO<sub>2</sub> étant faible. Pour 1 % de nitrate, ajouté à la composition, les émissions de NOx les plus élevées atteignent 5,4 kg/tonne de verre. Cette valeur équivaut à environ 2 700 mg/Nm<sup>3</sup> à 8 % de O<sub>2</sub>. Les émissions effectives de Nox, provenant des nitrates, varient entre 30 % et 80 % de ce maximum, la valeur moyenne dans des conditions industrielles, se situant autour de 50 à 65 %, bien qu'on trouve souvent toute la gamme de valeurs.



La quantité de NO, provenant des nitrates, dépend de la vitesse de chauffage, du rédox de la composition et de l'effet des gaz réducteurs, flammes réductrices, qui entrent en contact avec la couverture de la composition contenant des nitrates.

La recherche de solutions alternatives efficaces, aux nitrates est limitée par des considérations d'ordre environnemental et économique. On peut, par exemple, utiliser les sulfates. Mais la quantité nécessaire est beaucoup plus élevée, jusqu'à plus de trois fois, et cela provoque l'émission de SO<sub>2</sub>. Des oxydes d'arsenic peuvent également être employés. Mais ils sont généralement écartés pour des raisons environnementales. On peut employer, dans certains cas, l'oxyde de cérium. Mais il est beaucoup plus coûteux que le nitrate de sodium. Certaines modifications du procédé peuvent également contribuer à diminuer la quantité de nitrates exigée. Mais elles sont généralement écartées, en raison d'exigences de qualité, de la consommation d'énergie, des limitations de débit ou de la formation de NO<sub>x</sub> thermique.

En conclusion, on estime que les taux de nitrates pourraient être réduits au minimum compatible avec les exigences relatives au produit et à la fusion, après expérimentation. Mais une solution alternative efficace n'est pas disponible pour le moment, pour des raisons d'ordre économique et environnemental.

Dans de nombreux états membres, la législation a autorisé à doubler la limite des émissions de No<sub>x</sub>, pour les verres nécessitant l'adjonction de nitrates. Cette approche n'est pas considérée compatible en général, avec les exigences de la Directive 96/61/CE. Car elle ne prévoit pas d'importantes variations dans le niveau d'adjonction des nitrates et n'encourage pas les opérateurs à diminuer leur emploi. De plus, dans les procédés employant uniquement de petites quantités de nitrate, le fait de doubler la limite d'émission, peut masquer des émissions de NO<sub>x</sub> thermique élevées, en diminuant l'encouragement à optimiser les conditions de combustion.

L'emploi de nitrates ne peut pas être considéré comme un élément isolé du procédé de production. Généralement, les verres qui nécessitent l'adjonction de nitrates comportent d'autres contraintes spécifiques, liées à leur utilisation. Par exemple, la fusion de verre sodocalcique pour vaisselle ou emballages de luxe, diffère de la production de verre d'emballage courant, non seulement à cause de l'emploi des nitrates, mais aussi en raison du temps de séjour, au moins 50 % plus long, de la nécessité de conditions d'oxydation plus élevées dans la fusion et dans le four, et des températures plus élevées du verre, entre 50°C et 100°C de plus. Tous ces facteurs contribuent à augmenter les émissions de No<sub>x</sub>, par unité de production du verre, et peuvent être de 2 à 3 plus élevées, que pour les fours régénératifs à boucle, utilisés pour le verre d'emballage.

Le coût des méthodes de réduction de l'emploi de nitrates et des niveaux d'émission est difficile à quantifier et dépend en grande partie de la situation de départ et de facteurs spécifiques à l'usine.

#### 4.4.2.3 Fours spéciaux

La volonté de limiter les émissions de NO<sub>x</sub> a amené certains concepteurs de fours à proposer des fours à récupération, intégrant différentes caractéristiques prévues pour permettre de diminuer la température des flammes et, donc, le niveau de NO<sub>x</sub>. Le four le plus connu dans cette catégorie est le Sorg LoNO<sub>x</sub><sup>®</sup>. Un autre four conçu par Sorg est le Flex<sup>®</sup>, généralement étudié pour être utilisé dans des installations de production en discontinu, et dont les émissions de NO<sub>x</sub> sont comparables à celles du LoNO<sub>x</sub><sup>®</sup>. Une brève description du four Flex<sup>®</sup> figure au Chapitre 2. Mais seul le LoNO<sub>x</sub><sup>®</sup> est décrit de façon détaillée dans ce document.

#### Description de la Technique

[Sorg LoNO<sub>x</sub>]. [tm19 5yrs LoNO<sub>x</sub>]

Le fondoir à verre Sorg LoNOx<sup>®</sup> associe un affinage, dans un bain peu profond, au préchauffage des matières premières, afin de réduire le niveau des émissions de Nox, sans diminuer, du moins en théorie, le rendement thermique. L'affinant, par bain peu profond, force l'important flux de courant à s'approcher de la surface du bain de verre, en réduisant ainsi la différence de température entre celui-ci et la superstructure du four. Le four peut fonctionner à une température moins élevée qu'un four traditionnel de taille comparable.

Le préchauffage de l'air de combustion se fait par récupération et le préchauffage, en deux phases des matières premières, est utilisé justement pour compenser la différence de température de préchauffage de l'air de combustion, par rapport aux fours régénératifs. Les résidus gazeux, provenant des brûleurs principaux, passent au-dessus des matières premières, introduites dans le four, dans une vaste zone de préfusion, avant d'être introduits dans les récupérateurs. A la sortie des récupérateurs, les résidus gazeux passent à travers un dispositif de préchauffage du calcin externe, avant de quitter définitivement le système.

Le fondoir à verre LoNOx<sup>®</sup> est long et étroit, et se divise en trois parties. La première est utilisée pour le préchauffage et la préfusion de la composition et du calcin, la deuxième est la zone d'affinage, où la profondeur du bain de verre est réduite à 400 mm, ou moins, un affinant profond complète la structure du réservoir.

La source de chauffage principale est constituée par les brûleurs au gaz ou au fioul, dans la zone de fusion. Les résidus gazeux sont expulsés au-dessus de la surface de la composition et du calcin, dans la première partie du four. Le four est séparé par des parois internes, pour faire en sorte que les matières premières, introduites dans le four, ne soient pas directement chauffées par radiation de la chaleur, provenant de la zone la plus chaude du four. Une importante différence de température est maintenue entre les matières premières et les gaz, et la chaleur est transférée de manière efficace. Une petite quantité de boosting électrique peut être ajoutée, pour contribuer à maintenir les courants de convection, dans la zone de préchauffage. Cette action est favorisée par les dispositifs de barbotage, installés près de l'extrémité de la zone de fusion.

Le dispositif de préchauffage, du calcin externe, est placé après le récupérateur, et constitue une partie importante du fondoir à verre LoNOx<sup>®</sup>. Il s'agit d'un système de chauffage direct, où les résidus gazeux chauds et les calcins à chauffer entrent en contact. Le calcin et les résidus gazeux circulent en sens inverse. Le calcin entre par le cylindre, situé en haut, et descend lentement vers la sortie, les résidus gazeux entrent par le bas et sortent par le haut. Le dispositif de préchauffage possède des volets internes, qui répartissent de façon plus homogène, les résidus gazeux, à travers la colonne de calcin. Le calcin séjourne dans le dispositif de préchauffage pendant cinq heures environ. Les résidus gazeux entrent dans le dispositif de préchauffage à 500 °C en moyenne, et en sortent à 200 °C, en moyenne. La température de préchauffage du calcin est généralement de 400 °C.

### **Performances environnementales**

Grâce à des températures de fonctionnement peu élevées, des niveaux peu importants de NOx ont été constatés. Pour le four [Sorg LoNOx] on a constaté des émissions continues de 420 à 440 mg/Nm<sup>3</sup>, équivalentes à moins de 1 kg Nox, par tonne de verre fondu. Des émissions moins élevées pourraient être obtenues, avec une plus grande expérience de fonctionnement, et par l'application de techniques d'optimisation de la combustion.

### **Considérations d'ordre financier**

Dans [tm6 Nox industrie du verre] on estime que pour un four de production de verre d'emballage de 350 tonnes/jour, le coût d'exploitation supplémentaire, généré par cette technique, serait négligeable, tandis que l'investissement supplémentaire serait de l'ordre de 1,8 millions d'euros. Aucune autre information n'est disponible actuellement.

## Applicabilité

Cette technique implique un préchauffage considérable des matières premières, qu'on peut difficilement obtenir sans calcin. Ces fours ne sont réellement viables que lorsque de grosses quantités de calcin sont employées, à savoir supérieures à 70 %. Cela veut dire, par conséquent, qu'au moment de la rédaction du présent document, la technique n'est applicable qu'au secteur du verre d'emballage et à des fours employant >70 % de calcin. Cette technique ne peut être adoptée qu'à l'occasion de la réfection totale du four. Les dimensions du réservoir, long et étroit, peuvent en limiter l'applicabilité, lorsqu'on dispose d'un espace restreint.

## Considérations annexes

Cette technique peut obtenir un bon rendement, en matière de fusion, à savoir des valeurs de l'ordre de 3,3 GJ/tonne de verre fondu [tm19 5yrs LoNOx], pour un taux de calcin de 90 à 95 % et un boosting électrique de 3 %. Ce chiffre est comparable à celui des fours régénératifs modernes.

En raison de la faible profondeur du bain de verre, le four est long et étroit et la zone du four peut être considérablement plus vaste que celle d'un four traditionnel, pour une certaine tirée. Cela augmente l'encombrement et peut augmenter l'investissement nécessaire pour le four.

Dans la production de verre d'emballage, il est difficile de produire du verre ambré, avec de grandes quantités de calcin mélangé. Cette technique est relativement efficace, dans ce cas – en partie à cause de la faible profondeur du bain de verre – et on a pu fabriquer du verre ambré avec 95 % de calcin, et avec d'importantes quantités de calcin coloré mélangé.

Tout comme pour les systèmes de préchauffage du calcin, il existe un risque d'émission de substances organiques, y compris odorantes, ainsi que de dioxine et de furannes. D'après certaines mesures, les émissions de dioxine seraient inférieures à 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> TEQ. Ces questions sont traitées de façon plus détaillée au Paragraphe 4.8.

## Exemples d'installations

Gerresheimer Glas, Budenheim, Allemagne – verre d'emballage.

Wiegand & Söhne, Steinbach am Wald, Allemagne – verre d'emballage.

### 4.4.2.4 Le procédé FENIX

#### Description de la Technique

Le procédé FENIX se fonde sur l'association d'un certain nombre de mesures primaires, visant à optimiser la combustion et à réduire la consommation d'énergie. Tout comme les techniques décrites au Paragraphe 4.4.2.1. L'optimisation de la combustion, pour le système FENIX concerne :

- La réduction de l'excès d'air, générant des problèmes de qualité, ou des émissions de monoxyde de carbone.
- La suppression des points chauds et l'uniformisation des températures des flammes.
- le mélange progressif du combustible et de l'air de combustion

Toutefois, le procédé FENIX comporte aussi une modification complète du système de combustion et l'utilisation d'un nouveau type d'injecteurs. Ces modifications font l'objet d'une demande de brevet. Cette technique implique également une révision du système de contrôle du four et l'installation de méthodes de surveillance de certains paramètres du four. En particulier,

des sondes à oxygène sont installées dans la partie supérieure des chambres de régénération, pour permettre un meilleur contrôle de l'excès d'air.

Les principales modifications à apporter au système de combustion sont décrites dans la demande de brevet [tm36 brevet FENIX] et résumées ci-dessous.

Les pointes de température sont limitées par la longueur constante des flammes, malgré l'augmentation du volume de celles-ci. L'étagement de la combustion est obtenu par le contrôle de l'alimentation du combustible et de l'agent oxydant, afin d'échelonner le contact et/ou l'augmentation du volume des flammes. Une flamme 100 % oxygène peut être utilisée, dans la partie la plus chaude du four. L'échelonnement du contact est partiellement réalisé, en employant un gaz "tampon" inerte, au moins sur l'un des injecteurs. Le gaz inerte peut être du CO<sub>2</sub> ou bien du gaz de combustion recyclé, et il doit être injecté entre le chargement du combustible principal et celui de l'oxydant. Cela fait en sorte que la flamme se développe vers le centre du four, et favorise l'augmentation de volume de la flamme.

Le contact, entre l'oxydant et le combustible, peut être également retardé par un ou plusieurs injecteurs secondaires de combustible, placés à l'intérieur ou près de l'orifice d'entrée de l'air, au-dessus des injecteurs du combustible principal. Cette technique peut également impliquer l'utilisation d'injecteurs d'air ou de lances à oxygène, à différents endroits, pour maintenir une atmosphère d'oxydation, au-dessus du verre sans excès d'air. Ces dispositifs peuvent également être utilisés pour aider à contrôler la combustion. Un aspect très important de cette technique est la structure du brûleur, dont les spécifications techniques sont confidentielles.

### Performances environnementales

Le procédé FENIX est relativement nouveau et n'a été entièrement développé que dans un seul four, à savoir, la ligne de production de verre float de Saint-Gobain à Aniche, en France. Les résultats sont reportés dans [tm24 FENIX]. La concentration de NO<sub>x</sub> a été réduite de 1600 mg/m<sup>3</sup> à 580 mg/m<sup>3</sup>, à savoir de 63 %. La masse de NO<sub>x</sub> par tonne de verre fondu a été réduite de 4 kg/tonne à 1,25 kg/tonne, à savoir de 68 %. L'application de cette technique a permis des économies d'énergie d'environ 6 %, 5,76 GJ/tonne à 5,4 GJ/tonne, avec 21 % de calcin.

Suite à la publication de [tm24 FENIX] il a été confirmé que des niveaux d'émission de NO<sub>x</sub> de 510 mg/m<sup>3</sup> et 1,1 kg/tonne de verre fondu, sont régulièrement réalisés à Aniche.

### Considérations d'ordre financier

En raison des économies d'énergie réalisées, cette technique permet également des économies sur les frais généraux. Bien que l'investissement initial soit substantiel, le retour sur investissement est relativement rapide, en général moins de deux ans. L'investissement représente les nouveaux brûleurs et les systèmes de contrôle améliorés, environ 700 000 euros. Pour une nouvelle installation ou une réfection de four, nécessitant de nouveaux brûleurs, et un nouveau système de contrôle, l'investissement complémentaire ne serait pas excessif. Il faut également tenir compte des frais de licence, ainsi que du temps et de la compétence, nécessaires pour l'application de cette technique.

### Applicabilité

Au moment de la rédaction de ce document, cette technique n'a été mise en place que dans un seul four, de production de verre float, régénératif et à brûleurs transversaux, 600 tonnes/jour, alimenté au fioul lourd, avec un taux de soufre inférieur à 1 %. Toutefois, les responsables du développement de ce procédé déclarent, qu'en principe, il peut être appliqué à n'importe quel four, à brûleurs transversaux. Bien que des modifications soient nécessaires, pour les fours à gaz.

Cette technique est en cours d'application à d'autres fours du groupe, y compris à gaz. Pour chaque four, cette technique doit être appliquée avec prudence, par une équipe spécialisée. Saint-Gobain se dit prêt à accorder une licence non exclusive de la technologie FENIX à d'autres fabricants de verre, sous réserve de parvenir à un accord, sur les conditions de la licence.

### Considérations annexes

Au moment de la rédaction de ce document, cette technique a été appliquée à une seule installation. Mais elle pourrait être étendue à d'autres et semblerait être confirmée d'un point de vue technique. Toutefois, comme pour toutes les mesures primaires, les résultats peuvent varier d'une application à l'autre. On ne peut pas assurer que les résultats obtenus à Aniche soient systématiquement réalisables dans tous les cas. Les résultats dans d'autres applications pourraient être comparables, meilleurs ou moins satisfaisants, selon les conditions locales.

Le principal problème, que pose cette technique, est de savoir si elle peut être considérée comme disponible et accessible à toutes les installations, auxquelles elle serait applicable. La mise en place de cette technique est un procédé spécifique et de longue haleine. Saint-Gobain se dit prêt à accorder la licence technologique. Mais il convient de savoir si on dispose des compétences suffisantes, pour permettre la mise en place de ce procédé, à grande échelle et à moyen terme.

### Exemples d'installations

Saint-Gobain Vitrage, Aniche, France – verre float.

#### 4.4.2.5 Fusion à l'oxygène

##### Description de la technique

La fusion à l'oxygène est caractérisée par le remplacement de l'air de combustion par de l'oxygène, pureté > 90 %. Le combustible utilisé est soit du gaz naturel, soit du fioul. Mais le gaz est plus répandu. L'élimination d'une grande partie de l'azote, de l'atmosphère de combustion, permet de réduire le volume de déchets gazeux, principalement composé de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau, de 70 à 85 %, selon la pureté de l'oxygène. En général, les fours oxycombustion ont la même configuration de base que les fours à récupération, avec plusieurs brûleurs latéraux et un orifice unique d'échappement des gaz brûlés. La géométrie des fours les plus modernes est optimisée, pour le chauffage oxycombustion, et la réduction des NOx. Pour des raisons de sécurité, les fours conçus pour la combustion à l'oxygène, n'utilisent pas actuellement de système de récupération de chaleur, pour préchauffer l'oxygène arrivant dans les brûleurs.

La technique peut représenter d'importantes économies d'énergie, car il n'est pas nécessaire de chauffer l'azote atmosphérique, à la température des flammes. Le volume de gaz à chauffer est moindre et le four perd moins d'énergie. L'importance des économies d'énergie dépend en grande partie du four, avec lequel se fait la comparaison. Cette question complexe est étudiée plus loin dans ce paragraphe.

La formation de Nox, due à la chaleur, est beaucoup diminuée, car la principale source d'azote, dans le four est bien inférieure, malgré la présence d'une petite quantité d'azote dans l'atmosphère de combustion. Il provient de l'azote résiduel dans l'oxygène, AMV/AMP 4 à 6 %, cryogénique < 0,5 %, de l'azote dans le combustible, gaz naturel 2 à 15 %, de l'azote issu de la décomposition du nitrate et de l'air parasite éventuel. En raison de la température élevée des flammes, le N<sub>2</sub> présent est plus facilement transformé en Nox, et même un faible

pourcentage de  $N_2$  peut s'avérer non négligeable. Il est donc important de minimiser l'entrée d'air dans le four.

La température, des déchets gazeux du four, peut être très élevée, 1 200 à 1 300°C, et ils devront en général être refroidis. En raison de la forte teneur en eau et de la concentration en espèces corrosives, chlorures et sulfates notamment, le refroidissement est souvent réalisé par dilution dans l'air. Après dilution, les volumes d'effluents gazeux sont généralement de l'ordre de 70 à 150 %, des volumes des fours traditionnels, en fonction du degré de dilution nécessaire.

La fusion à l'oxygène fait intervenir des modèles de brûleurs différents de ceux utilisés dans le chauffage air-gaz classique. Depuis l'adoption de cette technique, les systèmes de brûleurs ont fait l'objet d'importantes recherches, des premières modifications des modèles existants pour d'autres applications oxycombustion, aux brûleurs actuels anti-Nox, hautement spécialisés et mis au point pour la fabrication du verre. Ces systèmes intègrent parfois certaines caractéristiques, d'autres brûleurs anti-NOx haute efficacité, destinés au chauffage classique. Certaines des caractéristiques les plus importantes, des principaux systèmes brevetés, sont résumées ci-dessous.

- Flammes plus longues et plus larges donnant une meilleure luminosité et assurant un transfert de chaleur plus profond et plus uniforme.
- Flammes plus plates avec une plus grande largeur d'étalement.
- Mélange retardé du combustible et de l'oxygène pour réduire les températures maximales de la flamme dans la zone riche en  $O_2$ .
- Par de refroidissement à l'eau.
- Réglage de la force et de la forme de la flamme.
- Peut utiliser plusieurs combustibles.

L'oxygène, nécessaire à la combustion, peut être livré à partir d'une source extérieure ou être fabriqué sur place. Sauf dans le cas de petites applications, production de fritte, etc. Les quantités d'oxygène nécessaires sont telles qu'il est plus économique de le fabriquer sur le site. Si celui-ci est situé à proximité d'un gazoduc d'oxygène industriel, il est souvent plus rentable de s'y approvisionner directement. Deux techniques principales permettent de produire de l'oxygène sur site, le procédé cryogénique et l'absorption. L'installation de production d'oxygène est souvent la propriété du fournisseur, qui l'exploite et qui facture l'oxygène fourni. Certains industriels préfèrent être propriétaires de leur installation de production. Les structures sur site sont toujours prévues avec une réserve d'oxygène liquide.

Le procédé cryogénique consiste à comprimer de l'air et à le faire passer dans une station de d'épuration, pour éliminer les poussières, l'eau, le dioxyde de carbone et les traces de polluants. L'air purifié est ensuite refroidi et envoyé dans une tour de distillation, à basse température, dans laquelle a lieu la séparation. Les gaz séparés peuvent alors être chauffés, dans des échangeurs de chaleur, pour fournir l'oxygène et l'azote, sous forme gazeuse et, si nécessaire, de l'oxygène liquide peut être prélevé, des parties les plus froides du circuit.

Le procédé d'absorption peut prendre deux formes, l'absorption modulée à vide, AMV, ou l'absorption modulée en pression, AMP. Il ne s'agit pas de techniques cryogéniques et la séparation est réalisée à température ambiante. La technique est souvent beaucoup moins coûteuse qu'un procédé cryogénique. Mais ses capacités sont limitées et elle est en général adoptée pour des besoins moyens. La plupart des sites, fournissant seulement un ou deux fours de verrerie, vont opter pour cette technique. Lorsque les fours sont nombreux ou que le besoin en oxygène est important, pour le verre float par exemple, le procédé cryogénique est préconisé. Le choix dépend surtout de facteurs économiques, qui peuvent être influencés par les conditions locales.

L'air comprimé pénètre, par le fond d'une des deux cuves de l'absorbeur, remplie de zéolite qui absorbe une grande partie de l'azote. L'oxygène est prélevé, par le haut de la cuve, jusqu'à



ce que la zéolite soit saturée d'azote. Le courant d'air est alors dirigé vers la deuxième cuve et l'azote de la première cuve est évacué vers l'atmosphère. Dans le système à vide, l'azote est évacué par le vide et dans le système en pression, il est déchargé à l'atmosphère sous pression. Le système à vide donne généralement les meilleurs rendements.

La technique du chauffage oxycombustion partiel, est utilisée dans la fabrication du verre depuis de nombreuses années. Deux techniques différentes ont été testées, le soufflage d'oxygène à la lance, qui correspond à une injection supplémentaire d'oxygène, dans un four air-combustible classique, afin d'améliorer le transfert de chaleur, ou l'installation d'un brûleur exclusivement oxycombustion. La technique était surtout utilisée pour résoudre des problèmes de qualité du verre et de production, en plaçant des flammes très chaudes, très précisément sur la surface du bain, de façon à augmenter les gradients de température et donc, améliorer les courants de convection, à l'intérieur du bain, masse fondue. Cela permettait également de réduire le courant de déchets gazeux, fournissant la même énergie au système. La technique servait souvent pour prolonger la durée de vie d'un four, qui montrait des signes de détérioration ou des problèmes de régénération. Elle sert toujours aujourd'hui de la même manière. Mais son emploi est moins répandu, en raison des risques d'augmentation des émissions de NOx, dues aux températures élevées.

### Performances environnementales

Par rapport aux fours air-combustible, les émissions de NOx sont généralement réduites de 70 à 90 %. Ces chiffres dépendent bien entendu du point de référence et peuvent être supérieurs à 95 % et inférieurs à 60 %. Pour les fours de fabrication de fibre ou de verre d'emballage, cette valeur correspond normalement à moins de 1 kg/tonne de verre fondu. Pour les verres spéciaux, sans addition de nitrate, ce chiffre peut être de 1 à 2 kg/tonne de verre fondu [tm32 Beerkens]. Les versions les plus récentes, de brûleurs oxycombustion, conjuguées à une géométrie et à une exploitation optimisée des fours, permettent parfois de réduire les émissions de 0,3 à 0,8 kg, NOx/tonne de verre fondu. Il n'existe aucune information sur les émissions pour le verre plat. Mais des valeurs comprises entre 0,5 et 1,5 kg/tonne de verre fondu, sont jugées probables.

Les concentrations de tous les polluants peuvent en fait être supérieures, en raison de la diminution du volume de gaz. Une correction à 8 % d'oxygène ne signifie pas grand chose, pour les fours oxycombustion. Mais la dilution, avec l'air de refroidissement, ramène en général les concentrations à des niveaux plus proches de la normale.

Le chauffage oxycombustion permet également de réduire les émissions globales de matières volatiles, issues du four ,particules, fluorures, chlorures etc., en raison d'un courant de gaz plus faible, au-dessus du bain de fusion et, dans certains cas, d'une diminution de la turbulence. Les émissions de particules, dans la production de verre sodocalcique, peuvent être réduites de 0,2 à 0,3 kg/tonne de verre fondu, bien qu'on ne rencontre pas ces chiffres dans toutes les applications [tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]. La réduction des émissions de particules est la plus efficace, pour les verres contenant du bore, jusqu'à 50 %. Aux Etats-Unis, on est passé à la fusion à l'oxygène, dans plusieurs cas, plus pour la réduction des particules que pour la réduction des NOx. La baisse de la consommation de combustible se traduit également par une baisse des émissions de SO<sub>2</sub>, pour les fours à fioul, et les émissions de CO<sub>2</sub> sont également diminuées, dans les mêmes proportions que pour d'autres économies d'énergie.

### Aspect financier

Les aspects financiers de la fusion à l'oxygène peuvent être très variés, selon les secteurs et les cas. Les coûts sont très difficiles à estimer, mais quelques chiffres indicatifs sont donnés au paragraphe 4.4.2.9. Les principaux facteurs intervenant dans les coûts sont :

- Le coût d'investissement, comparé à la solution la plus susceptible d'être utilisée.
- Les économies d'énergie qui peuvent être réalisées, dépendent en grande partie de la taille et de la configuration du four.
- Le prix de l'oxygène pour l'installation considérée.
- L'incidence potentielle sur la durée de la campagne et le risque financier qui en découle.

Un facteur important, du coût d'investissement, est que les fours oxycombustion ne sont pas équipés d'un dispositif classique de préchauffage du gaz de combustion et le coût d'investissement est donc inférieur à celui d'un four régénératif, ou à récupération de productivité comparable. Cette situation est particulièrement évidente, pour les nouvelles installations, qui font l'économie de la totalité du coût du système de préchauffage. Les brûleurs oxycombustion les plus modernes sont généralement plus onéreux que les brûleurs anti-NOx de conception avancée et les coûts du dispositif de régulation de l'oxygène sont assez élevés, de 0,3 à 0,45 millions d'euros. Pour la plupart des fours toutefois, les surcoûts que constituent les brûleurs oxycombustion et les systèmes de régulation sont bien inférieurs aux économies réalisées avec le préchauffeur. La technique pouvant avoir un effet néfaste sur la durée de vie des réfractaires. Certains exploitants pourraient être amenés à utiliser des matériaux plus coûteux, pour la voûte du four. Dans ce cas, ce surcoût pourrait diminuer considérablement le bénéfice du capital investi. Dans le secteur de la fabrication de fritte, les systèmes de préchauffage sont moins répandus. Mais les surcoûts d'investissement sont généralement récupérés dans les deux ans, par les économies d'énergie substantielles réalisées [tm8 S23.03].

Pour les fours régénératifs, les régénérateurs datent parfois de la première construction du four, et ils seront réparés, remis à niveau ou remplacés, selon les besoins au moment de la réfection de chaque four. C'est pourquoi, bien que substantielles, les économies ne seront pas aussi importantes que pour une installation neuve. Avec les fours à récupération, le récupérateur est en général remplacé, à chaque réfection. Mais la structure porteuse peut être réutilisée, si la configuration et l'emplacement du four restent dans l'ensemble inchangés. Les économies d'infrastructure, pour les installations neuves, sont de l'ordre de 20 %, pour les fours à récupération, et de 30 à 40 %, pour les fours régénératifs.

Si le fournisseur exploite l'unité de production d'oxygène, le coût d'investissement est généralement compris dans le prix de l'oxygène, et n'est pas pris en compte séparément. Le bâtiment, abritant l'unité d'oxygène, est en général fourni par le fabricant de verre. Mais ce coût est relativement bas. Si le fabricant de verre choisi d'exploiter lui-même l'unité de fabrication d'oxygène, le coût d'investissement peut représenter jusqu'à 10 %, de celui du four [tm29 Infomil]. Si l'azote, produit dans le cadre de la fabrication d'oxygène, peut être utilisé ou vendu, il pourra contribuer à réduire le coût global.

Plusieurs articles, dans la documentation de l'industrie du verre [exemple tm3 EPA. tm6 NOx industrie du verre], indiquent des coûts, pour le chauffage oxycombustion, supérieurs ou égaux à ceux de la SCR. Mais cela ne se vérifie pas dans la pratique. Pour certains industriels, les transformations n'entraînent aucune modification de coûts et pour d'autres, des économies sont réalisées, sur les coûts d'exploitation. La plupart des résultats positifs proviennent d'une transformation de fours plus petits, sans régénérateur qui utilisent peu de calcin.

Hormis les incertitudes quant à la durée de vie des réfractaires, dans la plupart des applications, le facteur déterminant le rapport coût-efficacité du chauffage oxycombustion, est la différence entre les économies d'énergie et le coût de l'oxygène, comparée aux coûts des autres techniques de réduction des NOx. Chaque cas est particulier et pour de nombreux fours plus petits la comparaison est positive. Pour les fours plus importants, les économies sont moindres en général et le bilan financier dépendra en grande partie de la situation et d'autres facteurs qui deviendront plus importants, en particulier le coût d'investissement annualisé. Les prix actuels de l'énergie et notamment de l'oxygène, tous deux sujets à des variations, sont des paramètres également très importants.

## Applicabilité

Bien que le principe de la fusion 100 % oxycombustion soit bien établi, en particulier dans le secteur du frittage, son utilisation dans l'industrie verrière, est limitée par un certain nombre de facteurs. Cette technique est toujours considérée, par certains secteurs verriers, comme une technologie en voie de développement, représentant des risques financiers importants. Mais de grands travaux de recherche sont en cours et le nombre d'installations, ainsi que le niveau d'expérience, sont en progression.

En général, il est plus intéressant de retarder l'installation, jusqu'à la prochaine réfection du four, afin de maximiser les avantages potentiels, et d'éviter les problèmes prévisibles de fonctionnement. En principe, les brûleurs oxycombustion peuvent être installés presque partout, sans attendre une réparation à froid. Une installation à chaud peut amener des économies d'énergie et une augmentation de la productivité. Mais elle ne se traduira probablement pas par une diminution des émissions de Nox, et risque d'augmenter les niveaux de NOx, avec le danger d'accélérer l'usure des réfractaires.

On estime que de 5 à 10 % de la production de verre, dans le monde, utilise la fusion à l'oxygène. Mais ce chiffre varie selon les secteurs. Il n'existe qu'une seule chaîne de fabrication de verre float aux Etats-Unis. En Europe, d'après [tm17 Ercole], 5,3 % de la production de verre d'emballage, est réalisée par chauffage oxycombustion. Pour la fibre de verre, laine de verre et fil de silionne, et les verres spéciaux, les chiffres sont de 27,5 % et de 48,5 %, respectivement. Les estimations, faites par le producteur français d'oxygène, Air Liquide indiquent que, sur la production verrière totale, par oxycombustion, 25 % est réalisée en Europe et 56 % en Amérique du nord.

Il existe plusieurs exemples de fours oxycombustion, fonctionnant de manière satisfaisante, dans les secteurs du verre d'emballage, de la laine de verre, des verres spéciaux, notamment le verre pour TV, du fil de silionne et de la fritte [tm32 Beerkens]. Des essais ont eu lieu dans la gobeletterie. Ils ont donné de bons résultats, pour ce qui est de la réduction des Nox. Mais de graves problèmes de moussage sont apparus. La qualité du verre n'a pas été affectée, dans ce cas particulier. Car l'essai était effectué, avec une composition moins sensible à ces facteurs. Les problèmes rencontrés, dans la gobeletterie sont identiques, à ceux rencontrés dans un premier temps dans les autres applications, comme le verre d'emballage. Il est probable que les mêmes solutions sont possibles. Mais elles seront plus difficiles à appliquer, en raison des normes de qualité plus exigeantes. Plusieurs exemples de fonctionnement satisfaisant de la technique existent dans le monde, pour la production de gobeletterie :

Orrefors Kosta Boda, Suède - < 5 tonnes /jour cristal

Verrerie de La Rochère, France – 17 tonnes/jour verre sodocalcique

St George Crystal, USA – 32 tonnes/jour cristal au plomb

Nachtman, Allemagne – 9 tonnes/jour cristal au plomb

La seule application connue, dans le secteur du verre plat, est la transformation récente, de la chaîne de Pilkington LOF, dans l'Ohio. Il semble qu'une autre transformation soit prévue aux Etats-Unis, pour une installation de verre float. Un des gros problèmes, avec la fusion à l'oxygène, pour le verre plat, est que ce procédé n'a pas encore fait ses preuves sur le plan économique ou technique, dans ce secteur. Il n'y a pas véritablement d'obstacles techniques, à son application. Mais on émet un certain nombre de réserves. Le principal souci est le risque d'une usure importante des réfractaires, et d'une diminution de la durée de la campagne, ou la nécessité d'une réparation onéreuse. Les très gros investissements et les énormes exigences de qualité, pour le verre plat, rendent les risques plus élevés que dans certains autres secteurs. De

plus, les hauts rendements thermiques obtenus, dans le secteur, signifient que les économies d'énergie seront beaucoup moins importantes.

On considérerait généralement que d'autres techniques de réduction des Nox étaient disponibles, si nécessaire, et que les bénéfices ne justifiaient donc pas, le risque d'être le premier à mettre en œuvre la technique. Chez Pilkington LOF, un certain nombre de facteurs sont spécifiques au site, et font que la technique pourrait être plus rentable. Ces facteurs, associés à l'état actuel des connaissances en la matière, et le désir de savoir comment se comporte la technique, ont conduit l'entreprise à décider de la mettre en œuvre. Aucun résultat n'est encore disponible.

### **Autres aspects annexes**

Une des questions les plus importantes, dans le cadre de cette technique, ce sont les économies d'énergie réalisables potentiellement. Comme on l'a vu, c'est souvent le facteur décisif, quant à la viabilité économique de la technique, dans une application particulière. Pour évaluer le rapport coût-efficacité, il faut la comparer, non seulement au four qu'elle remplace, mais aussi à toutes les options disponibles et aux mesures alternatives de réduction.

Les économies d'énergie peuvent être supérieures à 50 %, pour les petits fours dont le rendement thermique est médiocre, production de fritte par exemple. Pour un four à récupération, de taille moyenne, n'appliquant pas de mesures particulières d'économie d'énergie, disposant d'une isolation standard et utilisant uniquement du calcin interne, l'énergie utilisée, avec la fusion à l'oxygène, sera de l'ordre de 20 à 50 % inférieure. Toutefois, pour les gros fours régénératifs, d'un bon rendement énergétique, et dont le fonctionnement thermique est optimisé, les économies sont bien moindres, de 5 à 15 % - BOC plc, et parfois proche de zéro. Dans ce cas, les économies d'énergie sont moins susceptibles de compenser le coût de l'oxygène. Chaque cas est unique et doit être évalué par rapport à sa propre situation.

Les mesures d'économie d'énergie proposées, pour les fours classiques, chaudières de récupération, amélioration de l'isolation, brûleurs haute efficacité et préchauffage du calcin, n'ont pas été aussi largement appliquées, pour les fours oxycombustion. Quelques expériences ont été tentées avec ces techniques, au moment de la rédaction de ce document, et il semble qu'il y ait au moins deux fours, équipés de chaudières de récupération, et un disposant d'un préchauffage du calcin. Toutefois, avec l'expérience, un plus grand nombre de ces mesures peuvent être appliquées en parallèle, avec le chauffage oxycombustion. Aucune raison technique n'empêche l'application de la plupart de ces techniques, en parallèle avec le chauffage oxycombustion. Mais d'importantes questions techniques doivent être examinées, et leur résolution pourrait prendre du temps, par exemple, le niveau optimal d'isolation possible, sans altérer la durée de vie des réfractaires.

Un élément en particulier pourrait améliorer l'aspect économique de la fusion à l'oxygène, la récupération de la chaleur des effluents gazeux. La température élevée des déchets gazeux améliore les possibilités de récupération de chaleur. Mais on rencontre également un certain nombre de difficultés. Les déchets gazeux doivent être refroidis, avant d'être traités, de manière à atteindre la température de service, des équipements de réduction, et à assurer la condensation des particules, dérivées des matières volatiles. Dans de nombreux fours, la nature des effluents gazeux, limite l'utilisation d'échangeurs thermiques directs, en raison de problèmes d'encrassement, par les particules condensées et de corrosion. Ces problèmes sont aggravés par les fortes concentrations d'effluents gazeux, associées au chauffage oxycombustion. Les verres contenant du bore présentent un problème particulier. Car les gaz doivent être refroidis rapidement, pour éviter la formation de matières solides visqueuses, qui sont corrosives et entraînent facilement un encrassement des conduits et des équipements de réduction, comme les précipitateurs électrostatiques. C'est pourquoi le refroidissement tend à être réalisé par dilution avec de l'air.

La solution la plus prometteuse, pour récupérer la chaleur des effluents gazeux, issue des fours oxycombustion de verre d'emballage, pourrait être l'utilisation d'un dispositif de préchauffage de la composition et du calcin, voir paragraphe 4.8. Des essais ont été réalisés, avec le préchauffage de l'alimentation en oxygène. Les options de récupération de chaleur, dans les fours oxycombustion, sont examinées dans le document [tm45 Illy]. Des travaux de recherche ont été menés, sur le préchauffage des alimentations en gaz et en oxygène. Mais cette technique n'a pas été conduite à échelle industrielle et n'est donc pas considérée comme disponible.

Pour évaluer l'impact global, pour l'environnement, de la fusion à l'oxygène, il faut tenir compte de l'incidence de la production d'oxygène sur l'environnement. Celle-ci est très difficile à calculer, et varie beaucoup d'un cas à un autre. L'impact sur l'environnement de la production d'oxygène, concerne principalement les émissions associées à la production de l'électricité consommée. Celles-ci sont pratiquement impossibles à évaluer, sauf pour un cas particulier, pour lequel on peut extrapoler, entre autres, la consommation d'oxygène, la méthode de production, les statistiques nationales, des émissions moyennes, issues de la production d'électricité, et les économies d'énergie, dans cette application. En moyenne, la production d'oxygène, par la méthode AMV, consomme environ  $1,44 \text{ MJ/Nm}^3$  [information fournie par BOC].

On peut dire, d'une manière générale, que si les économies d'énergie de la fusion à l'oxygène, compensent les coûts de production d'oxygène, alors la baisse des émissions va largement compenser les émissions associées à sa production. Dans les fours à récupération, sans récupération supplémentaire de chaleur, chaudière à récupération ou préchauffage du calcin, l'économie d'énergie moyenne, y compris la production d'oxygène, sera comprise entre 25 et 35 % et, pour les gros fours régénératifs, entre 5 et 15 %, pour les fours régénératifs, disposant d'un très bon rendement thermique. Ce chiffre peut être inférieur à 5 %. Comme avec toutes les mesures de réduction qui nécessitent de l'énergie, les bienfaits pour l'environnement, qu'on peut constater sur le site, sont en partie atténués, lorsqu'on envisage le problème dans son ensemble.

La fusion à l'oxygène nécessite des températures de flamme plus élevées, ce qui, dans certaines applications, peut se traduire par une augmentation du taux de production, au mètre carré, jusqu'à 25 %. Ce facteur est particulièrement important, lorsque l'industriel souhaite augmenter la capacité du four, mais ne dispose pas de la place nécessaire, pour installer un four classique, de la taille souhaitée. L'absence de système de préchauffage contribue encore à cette situation. Dans certaines applications, la technique peut aussi se traduire par une meilleure maîtrise du procédé et l'amélioration de la qualité du verre. C'est le cas notamment, pour certains verres spéciaux, pour lesquels les températures de fusion sont très élevées. Toutefois, les proportions plus importantes d'oxygène et de vapeur d'eau, risquent de nuire aux propriétés chimiques, de certains types de verre, et nécessiter une modification de la composition de la charge.

On craint que l'élévation de température, associée à la technique, puisse se traduire par une plus grande usure des réfractaires, et que la durée de vie du four, en soit écourtée. Dans certains cas, elle peut aussi entraîner une quantité plus élevée de défauts dans le verre, dus par exemple, à un suintement de la voûte. Une diminution, de la durée des campagnes, peut avoir un impact financier très important sur une installation, notamment pour les fours de grandes dimensions, comme ceux qui fabriquent le verre float. L'expérience actuelle varie d'une application à l'autre, et peut être très prometteuse comme médiocre. De nombreuses études ont été menées, dans ce domaine, et le problème peut être considérablement amélioré. Quelques fabricants de verre borosilicaté signalent une durée de vie rallongée, pour leurs fours et, dans certaines applications, la transformation a permis d'obtenir des températures de voûte moins élevées.

Les nouveaux brûleurs, à grand pouvoir émissif, sont beaucoup plus performants, pour transférer la chaleur dans le verre. Conjugués à une conception bien pensée des fours, au positionnement rationnel des brûleurs, et à une meilleure qualité des réfractaires, ces brûleurs contribuent à faciliter le maintien de l'exploitation, dans les limites de résistance thermique des



réfractaires. L'utilisation de matériaux réfractaires, de meilleure qualité, risque d'augmenter les coûts d'investissement du four, et on craint encore qu'ils ne soient pas assez résistants, dans toutes les applications. Pour le verre sodocalcique, la pression de vapeur élevée de l'eau, peut entraîner une hausse des pressions de vapeur du NaOH, ce qui contribuerait à aggraver l'usure des réfractaires, notamment au-dessus de la surface du verre.

Au moment de la rédaction de ce document, les fours oxycombustion les plus anciens ont moins de dix ans, et l'expérience de la technique est en général insuffisante, dans les fours de grandes dimensions, pour être certains de son effet à long terme, sur la durée de vie des fours. Mais cette technique fait l'objet d'études en cours, et les fours conçus d'après les techniques les plus récentes devraient pouvoir assurer des campagnes plus longues que les fours plus anciens. On a enregistré des incidents de moussage de la composition, dans certaines applications. Ils peuvent entraîner des problèmes de qualité et réduire l'efficacité et la stabilité du chauffage.

Dans la fabrication de la laine de verre, les taux élevés d'oxygène, dans le four, peuvent faciliter le recyclage des déchets, contenant des matières organiques, sans avoir à utiliser des nitrates.

La forte concentration en vapeur d'eau, dans l'atmosphère du four, engendrée par le chauffage oxycombustion, peut être très intéressante pour la technique. Dans le document [tm17 Ercole], on observe que, si un moyen peut être trouvé, pour optimiser l'absorption chimique de l'eau pendant la fusion, des changements très favorables peuvent se faire dans la structure du verre. Les changements dus à la réaction avec la vapeur d'eau, peuvent réduire la viscosité du verre, à toutes les températures, et entraîner un meilleur transfert de chaleur, entre la flamme et le bain. Ils peuvent aussi faciliter le refroidissement, pendant le formage, ce qui est particulièrement important, pour le verre d'emballage et la gobeletterie.

### Exemples d'installations

Owens Corning Building Products, RU, Ltd. Cwmbran, Royaume-Uni – Laine de verre.

Schott Glas, Mainz, Allemagne – Verres spéciaux.

Pilkington-LOF, Ohio, USA – Verre float.

Heye Glas, Moerdijk. Pays-Bas – Verre d'emballage.

PPG Industries, Hoogezand. Pays-Bas – Fil de silionne.

James Kent Ltd, Stoke on Trent, Royaume-Uni - Fritte.

Saint Gobain Desjonqueres, Mers, France – Verre d'emballage.

### Synthèse

Etant donné la complexité des questions qui entourent cette technique, il semble opportun de résumer la situation.

#### Avantages :

- La réduction des émissions de NOx peut être très importante, de 70 à 90 %.
- Les coûts d'investissement, dans les fours, sont en général nettement inférieurs.
- Dans certaines applications, la technique ne coûte rien et permet des économies.
- D'importantes réductions de la consommation d'énergie sont possibles, dans certaines applications, notamment lors du remplacement d'un four à récupération.
- Possibilité de réduction des émissions de substances volatiles et de poussières.
- La réduction des volumes d'effluents gazeux peut entraîner une baisse des coûts d'investissement dans l'équipement de réduction des polluants.
- Possibilités d'améliorer la production au m<sup>2</sup> et la maîtrise du procédé.

#### Inconvénients :

- Si les économies d'énergie ne sont pas substantielles, la technique peut s'avérer très coûteuse,



- notamment pour les fours à verre sodocalcique de grande dimension.
- Le rapport coût-efficacité varie énormément d'une application à l'autre et doit être analysé au cas par cas.
  - Des problèmes ont été signalés concernant l'usure des réfractaires et ils n'ont pas été totalement résolus.
  - La production d'oxygène requiert de l'énergie électrique.
  - La technique est essentiellement une mesure primaire en ce sens qu'elle permet de réduire la formation de Nox, mais pas de réduire les Nox, issus de sources non thermiques, comme les nitrates contenus dans la composition.
  - La mise en œuvre de la technique est plus rentable au moment de la réfection du four.
  - Le stockage, la production et l'utilisation de l'oxygène, présentent des risques inhérents et il convient d'envisager des mesures de sécurité appropriées.
  - La production d'oxygène peut générer des bruits contre lesquels il faudra prendre des mesures.

**Tableau 4.8 : Principaux avantages et inconvénients de la fusion à l'oxygène**

La fusion à l'oxygène peut être une technique très performante, pour la réduction des NOx et, à l'exception du verre plat, et dans une moindre mesure de la gobeletterie, elle peut être considérée comme techniquement démontrée. En principe, on peut considérer que la fusion à l'oxygène est applicable à l'industrie du verre, dans son ensemble. Mais les problèmes de mise en place ne doivent pas être sous-estimés.

Certaines questions importantes n'ont pas encore été résolues, concernant l'incidence sur la durée de vie des réfractaires. Il semble probable que des solutions seront trouvées à ce problème. Mais il faudra du temps, pour en démontrer les effets à long terme, avec certitude. Jusque-là, un certain risque financier sera associé à la technique.

Sa compétitivité économique, dépend surtout des possibilités d'économie d'énergie et des coûts relatifs des techniques alternatives, pour obtenir des niveaux d'émission de NOx comparables. Dans de nombreuses applications, pour des fours de petites et moyennes dimensions, il est possible de réaliser des économies d'énergie importantes, de sorte que la technique est plus compétitive. En effet, pour certaines applications, notamment les fours < 50 tonnes par jour, les économies d'énergie peuvent être, à elles seules, une motivation suffisante, pour mettre en œuvre la technique. Les fours plus grands disposent souvent d'un meilleur rendement énergétique, et les possibilités de réduire la consommation d'énergie, sont bien moindres et le coût de la technique est globalement plus élevé. Dans un certain nombre d'applications, il est peu probable que les économies compensent les coûts et la technique ne représente pas toujours la méthode la plus rentable, de réaliser des réductions de NOx.

La fusion à l'oxygène n'est plus aussi compétitive, avec l'amélioration des performances d'autres techniques de réduction des Nox, notamment les techniques primaires et le procédé 3R, et avec les progrès réalisés, dans les rendements thermiques des fours. Toutefois, dans les applications où ces évolutions n'ont pas été aussi marquées, et où d'autres facteurs limitent leur application, la laine de verre et les verres spéciaux par exemple, la fusion à l'oxygène peut s'avérer être une technique très intéressante.

Les mérites, relatifs de la fusion à l'oxygène, varient énormément d'un cas à l'autre, et la décision de mettre en œuvre la technique, peut être nettement influencée par d'autres facteurs. Par exemple, si on souhaite augmenter la productivité, sans augmenter la taille du four, ou si l'installation est située à proximité d'une source d'oxygène bon marché. L'intérêt économique peut être à tel point tributaire de facteurs spécifiques au site, que chaque cas doit être analysé individuellement.

Les études se poursuivent, pour améliorer encore plus la performance du chauffage oxycombustion, et les fournisseurs d'oxygène continuent leurs travaux de recherche, pour réduire les coûts de la production d'oxygène sur le site.

La fusion à l'oxygène doit être considérée comme une suite de mesures efficaces de réduction des NOx qui pourraient, selon les conditions particulières à chaque installation, constituer la solution la plus appropriée. Elle doit cependant être admise comme une des techniques, permettant de déterminer les niveaux d'émission, qui correspondent aux MTD, dans l'industrie du verre.

### 4.4.2.6 Réduction chimique par le combustible ,CRF,

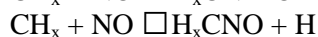
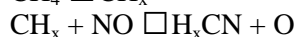
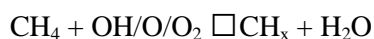
La réduction chimique, par le combustible, correspond aux techniques dans lesquelles le combustible est ajouté au courant de déchets gazeux, pour réduire chimiquement les NOx en N<sub>2</sub>, au travers d'une série de réactions. Le combustible ne brûle pas, mais se transforme par pyrolyse, pour donner des radicaux qui réagissent, avec les constituants des effluents gazeux. Les deux principales techniques, qui ont été mises au point pour l'industrie du verre, sont le procédé 3R et le procédé de polissage au feu. Ces deux techniques sont actuellement réservées aux fours régénératifs. Le procédé 3R est totalement au point pour l'industrie. Au moment de la rédaction de ce document, le procédé de polissage au feu, fait l'objet d'une deuxième phase d'essais de mise au point, à l'échelle industrielle, et a montré des résultats prometteurs.

#### 4.4.2.6.1 Le procédé 3R

##### Description de la technique

Le principe du procédé 3R consiste à ajouter un hydrocarbure, gaz naturel, fioul, etc., de manière contrôlée, au courant d'effluents gazeux, à l'entrée du régénérateur. Ce combustible ne brûle pas, mais se dissocie et agit chimiquement, pour réduire les NOx qui se forment dans le four. Cette technologie a été étudiée, pour les fours régénératifs. Car le régénérateur offre les conditions nécessaires de température, de mélange turbulent et de temps de séjour, pour que les réactions se produisent. Le nom du procédé "3R" vient des mots Réaction et Réduction, dans les Régénérateurs.

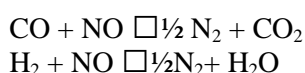
On distingue deux étapes importantes, dans le procédé 3R, la désoxydation des NOx et la combustion totale. La phase de désoxydation des NOx fait intervenir deux mécanismes principaux. Le premier implique une réaction, entre les radicaux du combustible et NO. Des radicaux, CH<sub>x</sub>, sont formés principalement par décomposition thermique, pyrolyse, qui se produit très rapidement, lorsque le combustible pénètre dans le régénérateur. Les principales réactions qui se produisent à ce stade sont :



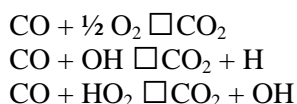
Ces réactions sont très rapides et s'observent surtout dans la chambre supérieure du régénérateur. Elles représentent environ 25 %, de la réduction des NOx.

Le second mécanisme se produit lorsque les déchets gazeux descendent dans l'empilage du régénérateur, où le temps de séjour est relativement long. Le CO et le H<sub>2</sub>, formés par le combustible primaire, et par le combustible 3R, ont assez de temps, à une température suffisamment élevée, pour réduire pratiquement tout ce qui reste de NO en N<sub>2</sub>. Cette réaction

s'observe dans tout le régénérateur, mais surtout dans l'empilage, et représente une grande proportion de la réduction des Nox, obtenue avec le procédé 3R. Les principales réactions sont :



La deuxième étape du procédé concerne la combustion totale des espèces réduites, surtout le CO et le H<sub>2</sub>, qui n'ont pas réagi. Ces espèces sont oxydées, par l'apport contrôlé d'air, dans les conduits, en dessous du régénérateur. Les principales réactions sont les suivantes :



### Performance environnementale

Le taux de réduction des Nox, obtenu avec le procédé 3R, dépend principalement de la quantité de combustible ajouté, qui peut être adaptée, pour répondre à diverses normes d'émission. La technique permet d'obtenir des concentrations inférieures à 500 mg/Nm<sup>3</sup> à 8 % de O<sub>2</sub>, en volume sec et, dans certaines applications, des chiffres proches de 400 mg/Nm<sup>3</sup>, ont été atteints. Selon l'application, ces valeurs correspondent entre 1,0 et 1,5 kg/tonnes, de verre fondu, et à une réduction globale des Nox, comprise entre 70 et 85 %.

### Aspect financier

On a estimé que les coûts d'investissement pouvaient atteindre jusqu'à 300 000 euros. Mais ils sont souvent bien inférieurs à ce chiffre. Dans des conditions de fusion optimisées, les coûts d'exploitation, pour obtenir 500 mg/Nm<sup>3</sup>, sont compris entre 1,5 et 2,0 d'euros, par tonne de verre fondu, principalement du fait des besoins en combustible, ce qui équivaut à environ 350 euros par tonne de NOx éliminé. A ces coûts, il faut ajouter le coût de la concession du brevet pour la technologie. Le calcul de la concession du brevet est assez complexe. Mais sur la durée d'application du brevet, elle équivaut à environ 0,5 d'euros, par tonne de verre fondu.

### Applicabilité

Pour l'instant, la technique n'est jugée applicable qu'aux fours régénératifs. Mais elle peut être mise en œuvre dans des installations nouvelles ou existantes, avec chauffage au gaz naturel ou au fioul. Sept fours utilisent actuellement ce procédé et de nombreuses autres installations ont obtenu une autorisation, pour le mettre en place. La technique ne s'est pas répandue davantage parce que les niveaux d'émission de Nox, avec les méthodes primaires de réduction, répondent en général aux normes en vigueur.

On craint que l'atmosphère réductrice, créée à l'intérieur des régénérateurs, n'endommage certains types de matériaux réfractaires, notamment si les températures sont également plus élevées. Une grande partie de la pratique de cette technique a été acquise, dans les fours de verre float, dont les régénérateurs sont souvent équipés de réfractaires d'excellente qualité. La probabilité d'une détérioration des réfractaires est plus grande qu'avec des matériaux de moins bonne qualité, par exemple contenant du Ca, du Fe et du Cr, qu'on rencontre dans certaines installations de verre d'emballage. Cette situation est spécifique à chaque cas. Mais le remplacement des réfractaires existants, par des matériaux de meilleure résistance thermique et chimique, pourrait entraîner une forte augmentation des coûts.

Les chercheurs, qui ont mis au point cette technique, pensent qu'il ne sera pas nécessaire, dans la grande majorité des cas, de faire des réparations sur les régénérateurs. Le paragraphe 4.4.2.9 présente les coûts possibles, en limite des fourchettes probables, avec et sans réparation.

### Autres aspects annexes

Les principaux inconvénients du procédé 3R sont que l'utilisation d'hydrocarbures, pour réaliser une bonne réduction des Nox, entraîne un coût inhérent et une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Il est donc intéressant d'associer le procédé 3R, à des mesures primaires plus classiques, de réduction des Nox, afin de diminuer les besoins en combustible 3R.

Avec l'installation d'une chaudière de récupération, une grande partie de l'énergie, dans le combustible 3R, peut être récupérée, et l'augmentation globale de CO<sub>2</sub> sera minimale. La mise en œuvre du procédé 3R n'implique pas nécessairement qu'une chaudière de récupération soit globalement rentable. Mais, lorsque celle-ci est déjà installée ou que l'installation est prévue, le procédé 3R se traduit par une augmentation avantageuse de la capacité du four, avec laquelle la chaudière peut être utilisée. Globalement, cela peut entraîner une économie substantielle des besoins énergétiques de l'installation, et permettre de réduire nettement la consommation d'autres sources d'énergie, chaudière à combustible fossile, par exemple. En fonction de l'application spécifique, cette économie d'énergie signifie que le procédé 3R peut faire réaliser des économies financières importantes, un exemple [tm39 mise à jour 3R] cite environ 600 000 euros/an.

En l'absence de dispositif de récupération de chaleur, le supplément de combustible nécessaire correspond à environ 7 %, de l'énergie de fusion. Cela entraînerait une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> de 20 à 30 kg, par tonne de verre fondu, soit 4 à 6 tonnes par tonne de NOx éliminés. En pratique, les besoins précis en combustible, pour obtenir la réduction de NOx souhaitée, peuvent varier selon les conditions spécifiques au four. Par exemple, si les conditions doivent être oxydantes dans le four, il faudra plus de combustible, que lorsque les conditions sont plutôt réductrices.

Bien que le procédé 3R soit parfois considéré comme une technique primaire, en raison de sa relative simplicité, il partage une importante caractéristique avec les techniques secondaires, comme la SCR et la SNCR, en ce sens qu'il ne permet pas seulement de réduire les Nox, provenant de réactions thermiques, mais également les Nox, issus d'autres sources, comme les matières premières.

### Avantages :

- Permet des réductions substantielles de NOx.
- Applicable à la plupart des types de fours régénératifs.
- Pas de modifications majeures de la configuration ou de l'exploitation des installations.
- Faibles coûts d'investissement.
- Peut être mis en œuvre sans avoir à arrêter le four.
- Pas de réactifs chimiques.
- L'augmentation de la consommation de combustible peut, dans certains cas, être compensée par une récupération de chaleur.
- Peut être considérée comme une technologie démontrée et disponible.
- Réduit les NOx issus de n'importe quelles sources.

### Inconvénients :

- Augmentation de la consommation de combustible, de 7 % en général, mais qui peut être compensée par la récupération de chaleur.
- Augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>, de 20 à 30 kg/t de verre fondu, mais qui peut être compensée par la récupération de chaleur.
- Inquiétudes quant à l'effet sur les réfractaires des régénérateurs, dans certaines applications.
- S'applique exclusivement aux fours régénératifs.

**Tableau 4.9 : Principaux avantages et inconvénients du procédé 3R**

### Exemple d'installations

Pilkington RU Ltd, Greengate Works, St Helens, Royaume-Uni.

Flachglas AG, Weiherhammer, Bavière, Allemagne.

Flachglas AG, Gladbeck, Rhénanie-Westphalie, Allemagne.

Pilkington Finlande

Pilkington LOF, Ohio, Californie

Samsung Corning, Corée

(Verre float dans toutes les installations sauf verre pour TV chez Samsung Corning)

#### 4.4.2.6.2 Polissage au feu

[tm53 Gas Reburning], [tm54 Gas Reburning2], [tm55 Field Test] et [tm56 GazdeFrance]

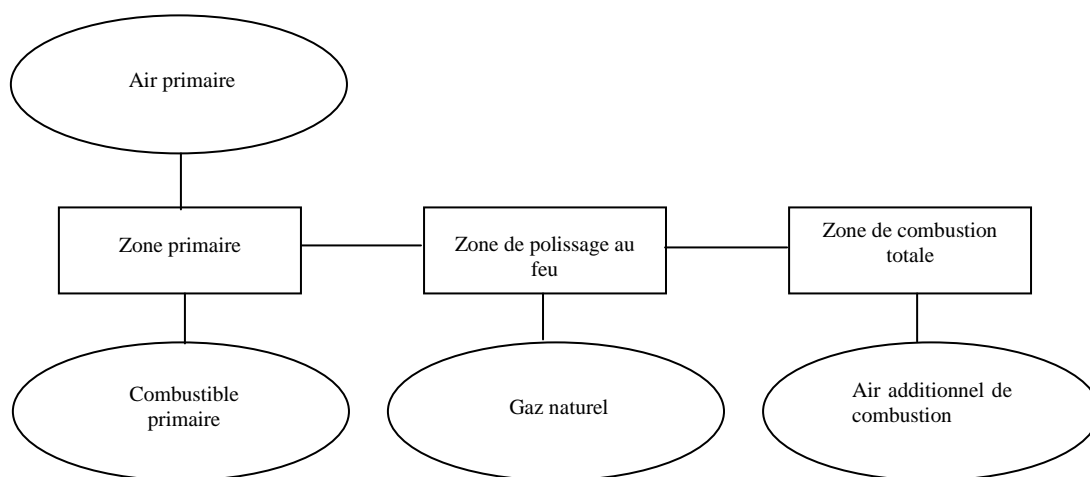
#### Description de la technique

Le polissage au feu est une technologie de modification de la combustion, permettant d'éliminer les Nox, des produits de combustion, en utilisant le combustible, comme agent réducteur. On peut l'utiliser pour lutter contre les émissions de pratiquement n'importe quelle source continue de rejet, et elle n'est pas spécifique à un combustible, bien que le gaz naturel soit plus souvent utilisé.

A l'origine, la technique était appliquée à de grosses installations de chauffage, au début des années 80. Elle repose sur le principe que les radicaux CH pyrolysés vont réagir, pour réduire les espèces NO en N<sub>2</sub>, par le biais d'une série de réactions. La technologie, de polissage au feu, a été démontrée avec succès, sur des chaudières, obtenant une efficacité de réduction des NOx de l'ordre de 50 % à 65 %, avec un coût limité, par tonne de NOx éliminé.

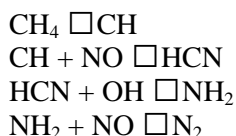
Ces résultats ont conduit à envisager l'application du polissage au feu à l'industrie du verre. Les fours de verrerie semblaient être de bons candidats pour mettre en place le procédé. Car ils possèdent de grandes cavités en aval du fondoir à verre, conduits de cheminée et voûte des régénérateurs, et des caractéristiques comme des gaz chauds de combustion et des concentrations initiales élevées de NOx.

Un schéma du procédé est présenté ci-dessous. Le procédé de polissage au feu est conçu en trois zones, primaire, de polissage au feu et de combustion totale. Dans la zone primaire, le combustible et l'air sont chauffés par les brûleurs existants du four, à la quantité stœchiométrique du combustible primaire normal, ou réduit. La proportion de Nox, sortant de la zone, est le point de départ du procédé de polissage au feu où le combustible de polissage est injecté, en aval de la zone primaire, pour créer une zone de réduction des Nox, riche en combustible. En fonction de la stœchiométrie primaire, la quantité de combustible requise est de 5 à 20 %, du combustible primaire. Dans la zone de combustion totale, on ajoute de l'air pour appauvrir le combustible et oxyder toutes les espèces non brûlées.



**Figure 4.1 : Schéma général du procédé de polissage au feu**

Les radicaux d'hydrocarbures, formés à partir du gaz naturel, dans la zone de polissage au feu, riche en combustible, principalement des espèces CH, réagissent avec le NO, formé dans la zone primaire, pour donner d'autres espèces azotées, telles que HCN et NH<sub>3</sub>. Une fois formées, ces espèces réagissent rapidement, avec d'autres molécules de NO primaire, pour donner de l'azote moléculaire, N<sub>2</sub>. Après avoir laissé le combustible rebrûlé se mélanger et réagir avec les gaz de combustion, de l'air de combustion est injecté, pour compléter la combustion du combustible rebrûlé. Dans la zone de combustion totale, toutes les espèces restantes d'azote réduit, sont complètement converties, en azote moléculaire, N<sub>2</sub>, ou à nouveau en NO. On a montré que la température élevée des gaz de combustion et les fortes concentrations en NOx primaire, permettaient d'améliorer la réduction des Nox, qu'il est possible d'obtenir avec le polissage au feu. Si le polissage au feu peut être réalisé dans des conditions presque isothermes et avec des temps de séjour d'environ 0,5 seconde, il est possible en théorie d'atteindre des réductions importantes de NOx. Le schéma de la réaction principale est résumé ci-dessous :



Pour appliquer le polissage au feu, aux fours de verrerie, il faut que le combustible rebrûlé soit injecté, dans la partie terminale du four, ou juste en aval de celui-ci, afin de minimiser l'incidence sur la distribution de chaleur, au-dessus du bain. Pour les fours de verrerie, où le temps de séjour du gaz est suffisant, entre le point d'injection du combustible rebrûlé, et le dispositif de récupération de chaleur, le régénérateur ou le récupérateur, l'air de combustion totale doit être injecté juste en amont du dispositif de récupération de chaleur.

### Performances environnementales

Cette technologie a été expérimentée en 1996, sur un four à verre d'emballage de 350 t/jour, situé à Antioch, en Californie, USA. En attendant la mise en place de la législation, sur la lutte contre les Nox, on a choisi un objectif avec taux de réduction de 50 %, 2,5 kg de NOx/tonne de verre. Les mesures de base indiquaient des émissions d'environ 3500 mg/Nm<sup>3</sup> de NOx à 8 % de O<sub>2</sub>, et en réduisant la quantité d'air primaire, ce chiffre a été réduit à 2 500 mg/Nm<sup>3</sup>. Après avoir utilisé 5 % de gaz naturel, par rapport à l'admission de chaleur primaire, on a pu obtenir 1800 mg/Nm<sup>3</sup> et, en augmentant la quantité de gaz de polissage au feu à 9 %, les émissions de Nox,



ont pu être réduites à 1 000 mg/Nm<sup>3</sup>. Une augmentation de 40°C, des gaz de fumée, jusqu'à 80°C, a entraîné une hausse de la température de l'air préchauffé. Ainsi, deux tiers de l'énergie ont été récupérés, avec 9 % de gaz naturel, et une hausse de la consommation de combustible de 3 %.

Une autre expérience est en cours, dans une installation à Glaverbel, en France. L'objectif principal est de réduire les émissions de NOx de 50 % ou d'atteindre 500mg/Nm<sup>3</sup>. La stratégie pour atteindre cet objectif est de se concentrer sur les orifices, qui génèrent les plus hauts niveaux de Nox, et donc plus faciles à traiter. Selon la configuration, on espère pouvoir récupérer au moins 50 % de l'énergie. La consommation supplémentaire de combustible devrait donc être limitée à environ 4 %.

### **Aspect financier**

Les coûts d'investissement, du procédé de polissage au feu, sont estimés à 800 000 euros pour un four de verre plat de 500 t/jour, 500 000 euros pour un four de verre d'emballage de 250 t/jour et 320 000 euros pour un four de fibre de verre de 125 t/jour. Les coûts d'exploitation dépendent du nombre d'orifices à traiter, de la quantité de gaz utilisé, et du pourcentage de chaleur récupérée. Ces coûts représentent environ de 0,5 à 1,5 euros/tonne de verre.

### **Applicabilité**

La technique est applicable aux fours neufs ou déjà existants. Toutefois, au moment de la rédaction de ce document, il n'existe pas d'exemples de son utilisation, à long terme et à grande échelle et elle est toujours considérée comme une technique en cours de développement. Le polissage au feu convient à des opérations de mise à niveau, car les modifications nécessaires, pour le mettre en œuvre sont minimales. La mise en place du procédé de polissage au feu, pendant la réfection d'un four, offre la possibilité de minimiser l'incidence, sur sa performance thermique et d'accroître la réduction de NOx. Par exemple, il est possible de concevoir les régénérateurs de façon à récupérer, en grande partie, la chaleur du combustible rebrûlé et à mettre en œuvre un concept avancé de polissage au feu des gaz. La technologie de polissage au feu s'applique généralement après les techniques primaires de lutte contre les NOx et peut permettre d'obtenir des réductions de NOx pouvant atteindre 70 %.

### **Autres aspects annexes**

Le critère principal, pour le polissage au feu, est d'atteindre un rapport stœchiométrique dans la zone de polissage au feu de 0,9, c'est-à-dire le rapport stœchiométrique optimal pour une opération de polissage au feu. Pour les fours de verrerie, on suppose que le combustible rebrûlé est ajouté au système, en aval du fondoir à verre, pour minimiser tout impact éventuel du polissage au feu, sur le bain de fusion. Dans une application réelle, il est possible d'injecter le combustible de polissage au feu, à l'extrémité de la zone de fusion. Mais cette possibilité doit être évaluée, pour chaque installation. L'injection de combustible rebrûlé, en aval du bain, peut diminuer l'efficacité globale du four, si l'apport additionnel de chaleur n'est pas complètement récupéré, dans les régénérateurs. Pour minimiser la quantité de combustible rebrûlé, injecté et l'impact sur le rendement du four, il faut donc minimiser le rapport stœchiométrique, entre 1,01 et 1,05. Ces valeurs devraient pouvoir être réalisées, dans la plupart des fours de verrerie. Mais il faudra peut-être procéder à l'optimisation de l'allure de chauffe et de la distribution du compartiment de fusion. Dans les fours où il n'est pas possible de modifier le rapport stœchiométrique de fusion, sans influencer sur le fonctionnement du four, ou la qualité du verre, une partie de l'énergie, associée au combustible rebrûlé, sera absorbée par le régénérateur, en donnant des températures de préchauffage de l'air plus élevées. Une consommation plus faible du combustible primaire, se traduira par des débits d'air plus petits et une diminution de la demande en combustible rebrûlé et en air additionnel de combustion. Déterminer le bilan de matières rebrûlées doit se faire en répétant le calcul.

L'injection du combustible rebrûlé, en aval du four, augmente la température des gaz de fumée, dans les régénérateurs de 50°C à 100°C, en fonction de la configuration. Par conséquent, la température de l'air préchauffé augmente et permet de récupérer une partie de l'énergie, utilisée pour le polissage au feu. Pour limiter l'augmentation de température dans les régénérateurs, la quantité d'air additionnel de combustion est régulée. La proportion d'énergie récupérée dépend de la quantité de gaz utilisée pour le polissage au feu, et de la quantité d'air additionnel de combustion injecté. Jusqu'à deux tiers de l'énergie utilisée, pour l'opération de polissage au feu, peuvent être récupérés.

### Exemple d'installation

Glaverbel, France – Verre float

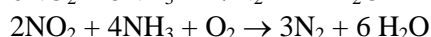
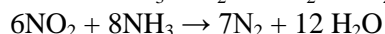
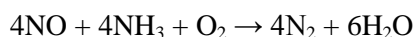
#### 4.4.2.7 Réduction catalytique sélective , SCR

##### Description de la technique

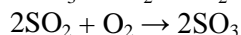
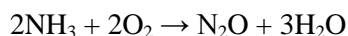
La SCR consiste à déclencher une réaction de Nox, avec de l'ammoniac, dans un lit catalytique, à la température appropriée. Plusieurs catalyseurs peuvent être utilisés, chacun ayant une fenêtre de température légèrement différente. Les catalyseurs les plus courants sont le vanadium et les oxydes de titane, en général  $\text{TiO}_2$  et  $\text{V}_2\text{O}_5$ , imprégnés sur substrat métallique ou céramique. On utilise aussi parfois un tamis moléculaire de zéolites, la réaction ayant lieu dans la structure poreuse microscopique. Les résultats des zéolites peuvent être optimisés, en ajoutant à la structure des métaux comme le platine ou le palladium. Quel que soit le catalyseur utilisé, il est important de maintenir la bonne température de service, en général entre 200°C et 500°C, l'optimale se situant entre 300°C et 450°C.

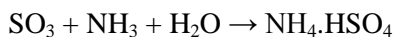
Les unités catalytiques utilisées, dans l'industrie du verre, sont des structures alvéolaires moléculaires. Mais des formes granulaires ou plates sont également utilisées, dans certaines industries. La taille des unités dépend du volume d'effluents gazeux à traiter, et du niveau requis de réduction des NOx. La structure moléculaire facilite le remplacement d'une section ou l'addition d'un nouveau catalyseur. La durée de vie des catalyseurs dépend de nombreux facteurs, mais en particulier de la composition des gaz et de la configuration de l'installation. La plupart des fournisseurs garantissent trois ans ou plus et, dans la plupart des applications industrielles, on peut escompter 5 à 6 ans, sans détérioration notable de l'activité. Au début de l'application, dans l'industrie verrière, des problèmes sont apparus et l'activité était sérieusement réduite après 3 ans.

Les unités sont normalement conçues pour obtenir une réduction des NOx de l'ordre de 75 à 95 %. En théorie, le taux de réduction des Nox, augmente avec le rapport  $\text{NH}_3/\text{NOx}$ . Mais celui-ci est généralement maintenu en dessous de 1,1/1, pour minimiser le passage d'ammoniac. Les NOx réagissent avec  $\text{NH}_3$ , selon la série de réactions indiquées ci-dessous. Ces réactions se produisent normalement à environ 950°C, SNCR. Mais la présence du catalyseur abaisse la température, en absorbant le  $\text{NH}_3$  qui réagit avec le NO de la phase gazeuse. L'ammoniac est injecté, en amont du catalyseur, soit sous forme de  $\text{NH}_3$  liquide, soit en solution aqueuse. On utilise de l'urée, dans certaines applications. Mais l'industrie du verre n'y est pas favorable.



Plusieurs réactions indésirables peuvent également se produire.





Avec la SCR, la production de  $\text{N}_2\text{O}$  est très faible et ne présente pas de problèmes en général. La formation de  $\text{SO}_3$  et la réaction consécutive, avec le bisulfate d'ammonium,  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ , peuvent constituer un problème, en particulier avec des combustibles à forte teneur en soufre. Le bisulfate d'ammonium peut empoisonner le catalyseur et provoquer l'encrassement et la corrosion de l'équipement. Certains métaux alcalins, contenant des poussières,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , ou des métaux lourds, peuvent également empoisonner le catalyseur.

Des dispositifs de dépoussiérage très performants existent. Mais avec les opérations de verrerie, il est indispensable d'installer un dispositif d'élimination des poussières, avant l'unité de SCR. Ce dispositif doit réduire la concentration de poussières de 10 à 15  $\text{mg/m}^3$ , et il s'agit presque toujours d'un précipitateur électrostatique, de 2 ou 3 étages. Les températures de service, peu élevées des filtres à manche, nécessiteraient de réchauffer les effluents gazeux, jusqu'à la température de réaction, pour le catalyseur, ce qui augmenterait considérablement les coûts d'exploitation, et serait généralement jugé beaucoup trop onéreux. Il faut également souffler de l'air, à travers le lit catalytique, toutes les 2 heures environ, pour éviter le colmatage et l'occlusion, par les fines poussières restantes. L'utilisation d'un PE implique, dans de nombreux cas, l'installation d'un système de lavage des gaz acides, en amont du PE. Au moment de la rédaction de ce document, aucune expérience n'a été tentée, dans l'industrie du verre, avec chauffage au fioul lourd et SCR. Des travaux de recherche plus poussés sont nécessaires, pour déterminer si la technique est compatible.

### Performances environnementales

Les niveaux d'émission de  $\text{NO}_x$  réalisés dépendent, en grande partie, de la concentration à l'admission et de la quantité de catalyseur et d'ammoniac utilisés. La proportion d'ammoniac est en général maintenue en dessous de 1,1/1, pour limiter le risque de fuite de l'ammoniac. On enregistre, en général, des réductions de  $\text{NO}_x$  de l'ordre de 70 à 95 %, pour la plupart des applications. Certains secteurs de l'industrie, de verres spéciaux par exemple, affichent des émissions élevées de  $\text{NO}_x$  non réduits,  $>4000 \text{ mg/m}^3$ , et une réduction de 90 % devrait théoriquement donner une concentration inférieure à  $500 \text{ mg/m}^3$ . En théorie, avec une quantité suffisante de catalyseur, il est possible d'obtenir des niveaux d'émission très bas. Mais dans la pratique de nombreux facteurs limitent les résultats.

Sans des mesures primaires très efficaces de réduction des  $\text{NO}_x$ , les rejets des fours de verrerie se situeraient plutôt entre  $1200 \text{ mg/m}^3$  et  $2000 \text{ mg/m}^3$ , et une réduction de 80 à 90 %, donnerait des valeurs de moins de  $200 \text{ mg/m}^3$  à  $500 \text{ mg/m}^3$ , soit 0,5 à 1,0 kg/tonne de verre fondu. Avec la mise en place, en parallèle, des mesures primaires, décrites au paragraphe 4.4.2.1, on peut escompter des chiffres très bas.

Dans la plupart des applications actuelles de l'industrie du verre, la SCR est utilisée pour garantir la conformité avec la législation locale en vigueur, qui n'est pas en général inférieure à  $500 \text{ mg/m}^3$ . Sous réserve des restrictions, examinées dans ce paragraphe, la SCR permet donc d'obtenir des niveaux d'émission de  $\text{NO}_x$ , pour le traitement du verre, inférieurs à  $500 \text{ mg/m}^3$ ,  $<800 \text{ mg/m}^3$  lorsque la concentration à l'admission est élevée. Dans certaines industries, des chiffres inférieurs à  $200 \text{ mg/m}^3$ , ont été enregistrés et il est raisonnable d'envisager pouvoir atteindre de tels niveaux, dans certains cas, dans l'industrie du verre. Il faut cependant souligner, qu'au moment de la rédaction de ce document, ces chiffres n'ont pas été atteints, en pratique dans la verrerie, et il faut tenir compte à la fois des implications techniques et économiques. La plupart des applications actuelles, dans l'industrie du verre, ont montré des réductions de l'ordre de 70 à 80 %. Mais il est possible d'obtenir 80 à 95 %, en particulier avec une nouvelle installation [tm6  $\text{NO}_x$  Ind.duVerre].

### Aspect financier

Le coût de la SCR dépend en grande partie de la taille de l'installation, du volume d'effluents gazeux à traiter, et du taux de réduction des NOx recherché. On considère en général que la technique implique des coûts d'investissement élevés, et des coûts d'exploitation plus modérés. D'autre part, la SCR étant un système de réduction intégré à trois étages, le coût de la technique dépend de la prise en compte ou non des coûts du PE, et de l'épurateur de gaz. Dans certains cas, on peut faire valoir que sans la mise en œuvre de la SCR, le four n'aurait pas besoin d'un équipement de dépoussiérage. Dans d'autres cas, on peut estimer qu'il s'agit d'une spécification inhérente.

Les informations disponibles ne sont pas toujours faciles à interpréter, et sont souvent spécifiques à une situation. Elles sont résumées ci-dessous.

Les données les plus complètes ont été communiquées par l'installation de verre float Euroglas en France. Les coûts mentionnés ci-dessous sont basés sur un taux de change de 6,6 francs français, pour un euro.

Le coût d'investissement, de l'ensemble du système s'élève à 3,5 millions d'euros, dont 1,3 millions d'euros, pour l'étage de la SCR. Il s'agit d'une installation neuve, pour laquelle aucun coût de remise à niveau n'a été engagé. Les coûts d'exploitation, pour une durée de vie des catalyseurs de 4 ans, un recyclage complet des poussières et à l'exception des intérêts et de l'amortissement, s'élevaient à 542 000 euros dont l'ammoniac 136 000, l'énergie 83 000, le calcaire 212 000, le remplacement des catalyseurs 76 000 et divers 35 000. Ces chiffres correspondent à une production brute de 182 500 tonnes de verre et une production nette de 156 950 tonnes, production nominale de 500 tonnes par jour. Le volume d'effluents gazeux représente environ 55 000 Nm<sup>3</sup>/heure.

La société Schott-Ruhrglass à Mitterteich, en Allemagne, exploite une unité SCR, depuis 1989, pour 6 fours, raccordés à un système SCR, avec un volume total d'effluents gazeux de 60 000 Nm<sup>3</sup>/heure. Les chiffres enregistrés en 1990 indiquent des coûts d'investissement de 1,5 à 2,0 millions d'euros et des coûts d'exploitation de 450 000 euros, amortissement et intérêts pour environ 100 000 euros inclus. Ces deux chiffres ne concernent que l'étage de la SCR et ne comprennent pas le traitement des poussières et des gaz acides [tm32 Beerkens]. Le coût d'investissement de la SCR a baissé, ces dernières années, grâce à la concurrence entre les fournisseurs.

La société PLM à Bad Münders, en Allemagne, exploite une unité SCR, desservant quatre fours de verre d'emballage, depuis 1994. Les coûts s'élèvent à 1,6 euros, 1 euro = 2 DM, amortissement en 13 ans et intérêts de 8 %, par tonne de verre produit, ce qui correspond à environ 450 000 euros par an. En 1994, le coût d'investissement s'était élevé à 2,3 millions d'euros. Ces deux séries de chiffres concernent uniquement la SCR.

Dans un rapport destiné à l'EIPPCB [tm32 Beerkens], une estimation de coût est réalisée, pour une gamme de fours. Ces chiffres sont résumés ci-dessous et comparés à d'autres techniques décrites au paragraphe 4.4.2.9. Les chiffres mentionnés s'entendent hors intérêts et amortissement. Les coûts d'investissement sont estimés, à plus ou moins 15 %, et les coûts d'exploitation à plus ou moins 30 %.

Capacité tonnes/jour	Volume de gaz Nm <sup>3</sup> /heure	Coût d'investissement (x 1 000) en euros	Coût d'exploitation (x 1 000) en euros par an
50 t/j Emballage	6 400	990	74
100 t/j Emballage	11 120	1 500	108
300 t/j Emballage	23 000	2 420	200
450 t/j Emballage	33 350	3 100	260
600 t/j Verre float	70 000	4 550	470
100 t/j Fibre de verre	12 000	2000 à 3000	139

**Tableau 4.10 : Coûts de la SCR avec précipitateurs électrostatiques et lavage des gaz acides**  
[tm32 Beerkens]

### Applicabilité

En principe, la SCR peut être appliquée à la plupart des procédés de verrerie et dans des installations nouvelles ou déjà existantes. Toutefois, plusieurs problèmes limitent considérablement l'applicabilité de la technique, dans certains cas. Ils sont résumés ci-dessous.

La technique n'a pas été mise en œuvre dans des installations chauffées au fioul lourd, en raison des taux élevés de  $\text{SO}_2$ , dans les gaz de fumée, qui peuvent provoquer la formation de bisulfate d'ammonium, et l'empoisonnement du catalyseur, ainsi qu'une corrosion. Cette situation pourrait également se produire, avec des fours à gaz, dont les taux de soufre sont élevés. Un des éléments clés, de l'aspect financier de la SCR, est la durée de vie du catalyseur, qui pourrait être considérablement réduite, en cas d'empoisonnement. Le document [tm47 French Submission] décrit un essai, avec un moteur diesel, fonctionnant au fioul lourd, ayant une teneur élevée en soufre, et la mise en œuvre de la SCR. Une réduction de 90 % a été démontrée, sans problème de fonctionnement pendant 2 500 heures.

La SCR est utilisée, dans l'industrie électrique, pour traiter les gaz contenant de fortes concentrations de  $\text{SO}_2$ , et le problème a été résolu, par la mise en place de techniques très efficaces de désulfuration des gaz de fumée, en amont de l'équipement. Il est peu probable que le taux d'élimination du  $\text{SO}_2$  des systèmes d'épuration, actuellement utilisés par l'industrie du verre, sera suffisant pour la SCR. Une élimination plus efficace du  $\text{SO}_2$  augmenterait considérablement les coûts et rendrait difficile le recyclage des matières récupérées dans le four, créant ainsi de nouveaux effluents. Des informations plus complètes sont données au paragraphe 4.4.3.

Le procédé SCR requiert beaucoup de place, en particulier, si les dispositifs d'épuration et de filtration ne sont pas encore installés. Dans certaines installations où l'espace est limité, cette situation augmenterait considérablement les coûts qui seraient alors prohibitifs.

D'une manière générale, il n'est pas possible d'utiliser le procédé SCR en parallèle, avec un filtre à manches. Car sa faible température de service impose généralement de réchauffer les effluents gazeux. Le coût du réchauffage du gaz, à environ  $400^\circ\text{C}$ , est souvent prohibitif, [tm32 Beerkens] estime ce coût à 800 000 euros par an, pour  $65000 \text{ Nm}^3/\text{heure}$ . Si une installation est déjà équipée de filtres à manche, il faudra les remplacer par des précipitateurs électrostatiques ou réchauffer le gaz. Les deux solutions augmentent considérablement les coûts. De même, les taux de poussières doivent être très bas,  $<15 \text{ mg/m}^3$ , de préférence  $<10 \text{ mg/m}^3$ , pour le procédé SCR et, si le PE en place n'est pas adapté, il faudra le mettre à niveau ou le remplacer.

La technique a été démontrée, pour certains verres contenant des taux élevés de bore, les tubes borosilicatés, pour la pharmacie, Schott-Ruhrglas, Mitterteich. Mais n'a jamais été testée pour la laine de verre ou le fil de silionne. Le problème éventuel de ces procédés est la présence de substances contenant du bore volatile, notamment de l'acide borique, dans les déchets gazeux. Ces matières risquent de se condenser, pour former des sels et des matières acides, avec une température descendue à  $60^\circ\text{C}$ . Avec les températures nécessaires pour la SCR, on observera probablement la présence de ces matières en quantités non négligeables. Elles pourraient sérieusement affecter la performance du catalyseur et seraient difficiles à éliminer par soufflage de suie.

### Autres aspects annexes

Pour l'industrie verrière, hormis les limites d'applicabilité décrites ci-dessus, le critère prépondérant, pour le procédé SCR, est le coût, comparé à d'autres techniques. Le paragraphe 4.4.2.9 compare les coûts de diverses techniques de réduction des NOx. La SCR est un procédé relativement coûteux, comparé à des mesures primaires, y compris le FENIX, au procédé 3R de Pilkington, à la SNCR et, dans certaines applications, à la fusion à l'oxygène. Toutes ces techniques se sont considérablement développées, ces dernières années et, dans de nombreuses applications, où les émissions non réduites étaient inférieures à 2 500 mg/m<sup>3</sup>, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'ajout de nitrates ou que les températures n'ont pas à être très élevées, il est possible d'obtenir des niveaux d'émission proches de ceux démontrés avec le procédé SCR. C'est pourquoi, hormis les cas où les concentrations, à l'admission sont très élevées, le procédé SCR n'est pas généralement considéré, par l'industrie du verre, comme la technique la plus performante.

Le réactif NH<sub>3</sub> est injecté sous pression, dans les gaz de fumée, en amont du lit catalytique, et on utilise, soit de l'ammoniac, soit une solution aqueuse, habituellement 25 %. Le NH<sub>3</sub> liquide est une matière dangereuse, et des problèmes importants de coût et de sécurité, sont associés à son stockage et à son utilisation. La plupart des procédés de verrerie ne font pas appel à ce type de produits chimiques, et les industriels préfèrent utiliser une solution aqueuse qui, elle aussi, doit être stockée et manipulée avec précaution.

Les émissions d'ammoniac sont également inquiétantes, et peuvent être un facteur qui limite l'efficacité de la technique. Plusieurs installations en activité, montrent que les émissions de NH<sub>3</sub> peuvent être maintenues, en dessous de 10 mg/m<sup>3</sup>, tout en conservant de bons indices d'efficacité.

### Avantages :

- Performance très élevée en matière de réduction des NOx.
- Permet de réduire les NOx toutes sources confondues, dans le four, et pas seulement les NOx issus d'une réaction thermique.
- Peut s'inscrire dans le cadre d'un système intégré de lutte contre les émissions atmosphériques.
- Plusieurs exemples dans l'industrie du verre et beaucoup d'autres ailleurs.
- Les fournisseurs donnent souvent des garanties des performances.

### Inconvénients :

- Des problèmes techniques restent à résoudre, dans certaines applications, avec chauffage au fioul ou certains verres contenant du bore.
- Consommation et émission d'ammoniac dont le stockage et la manutention sont des sujets d'inquiétude pour l'environnement et la sécurité.
- Le système consomme beaucoup d'énergie.
- Doit être installé avec une réduction des poussières et un lavage des gaz acides, les niveaux de poussières et de SO<sub>2</sub> doivent être très bas.
- Coûts d'investissement relativement élevés, en particulier pour les petites installations.
- Encombrement important.
- L'intérêt financier relatif est de moins en moins évident car des techniques moins chères sont mises au point.
- Des inquiétudes persistent concernant la durée de vie des catalyseurs.
- La température de service limite les possibilités de récupération de la chaleur.
- Un refroidissement du gaz peut être nécessaire pour les fours à récupération.

**Tableau 4.11 : Principaux avantages et inconvénients de la SCR**



## Exemples d'installations

Nom et implantation de l'usine	Volume de gaz Nm <sup>3</sup> /h	Entrée mg/m <sup>3</sup>	Sortie mg/m <sup>3</sup>	% de réduction	NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>
Schott-Ruhrglas. Mitterteich, Allemagne, verre borosilicaté	60 000	5 000	1 500	70	<20
Euroglas SA. Hombourg, France verre float	55 000	2 000	500	75	<5
PLM Bad Münder, Allemagne verre d'emballage	60 000	1 300	<400	>70	<2
Schott Glas GmbH. Mainz., Allemagne, verre pour TV	30 000	3 500 à 4500	650 à 850	70 à 80	<10
Philips, Aix-la-Chapelle, Allemagne, verre pour TV	30 000	4 000 à 5 500	450 à 850	75 à 85	<30
Oberland Glas AG, Neubourg, Allemagne, verre d'emballage – l'unité SCR a été arrêtée – niveau d'autorisation d'exploitation atteint avec mesures primaires	50 000	1 100	<500	55	<30

## 4.4.2.8 Réduction non catalytique sélective, SNCR

## Description de la technique

Au cours du procédé de réduction non catalytique sélective, également appelée désoxydation thermique des NOx, les oxydes d'azote contenus dans les gaz brûlés sont réduits par la réaction avec l'ammoniac, ou l'urée à haute température. L'industrie du verre n'utilise que de l'ammoniac et de la liqueur ammoniacale. Les réactions chimiques sont les mêmes que celles intervenant dans la SCR, décrite dans le paragraphe 4.4.2.7 ci-dessus. Les réactions ont toutefois lieu à une température plus élevée, sans avoir besoin de faire appel à un catalyseur. La plage de température est comprise entre 800 et 1100°C. Mais la majorité des réactions sont efficaces autour de 950°C. Dans certaines applications, on a suggéré que l'addition d'hydrogène, dans les effluents gazeux, pouvait faciliter la réaction, à des températures plus basses. Dans la SNCR, l'ammoniac est injecté plus près du four que dans la SCR, et l'opération nécessite un gaz vecteur. L'efficacité de la technique dépend d'une série de facteurs dont les principaux sont :

- La température.
- La concentration initiale en NOx.
- Le mélange uniforme du réactif et des gaz brûlés.
- Le rapport ammoniac/NOx.
- Le temps de réaction, 1 à 2 secondes sont nécessaires.

En particulier, il est important de respecter la plage de température. Si elle est trop basse, elle entraîne un échappement d'ammoniac et une baisse de l'efficacité, trop élevée, une plus grande quantité de NOx peut se former. Et il convient d'assurer une répartition uniforme du réactif, dans les gaz de fumées. Pour obtenir la bonne température, la position des injecteurs d'ammoniac est cruciale. Mais la zone où la température est correcte n'est pas forcément accessible, ou peut être modifiée, par les conditions opératoires, changements de charge par exemple. Ce changement de l'emplacement de la zone à la bonne température peut être pallié par la mise en place d'injecteurs supplémentaires. Mais cette solution entraîne un surcoût et dépend de l'accessibilité. On peut obtenir une distribution uniforme, avec une bonne conception

des conduits et, si nécessaire, la mise en place de dérivations, ou de tout autre dispositif, permettant de corriger l'orientation du flux.

La technique souffre de certains des problèmes d'exploitation, que peut rencontrer le procédé SCR, à savoir l'échappement d'ammoniac, la formation de  $N_2O$ , plus élevée avec l'urée, et la formation de bisulfate d'ammonium. La formation de bisulfate d'ammonium peut être plus élevée que dans la SCR. Car, pour la température de service, l'injection doit être effectuée en amont d'un filtre, ou d'un dispositif d'épuration. Il n'y a pas de catalyseur. Mais le bisulfate d'ammonium peut occasionner des problèmes d'agglutination.

### Performances environnementales

Des réductions de  $NO_x$  de l'ordre de 30 à 70 %, sont souvent mentionnées, pour la SNCR. Mais des chiffres supérieurs à 80 %, ont été signalés pour certaines applications. Ce qui influe le plus est le degré d'optimisation des facteurs, dépendant de la performance. Dans un procédé moderne, bien maîtrisé où les conditions optimales peuvent être obtenues, des réductions de 50 à 75 % sont possibles. En général, la technique est plus facile à mettre en œuvre, avec les fours à récupération qu'avec les fours régénératifs.

La concentration des émissions, à la sortie, va dépendre de la concentration initiale, et les meilleurs résultats seront donc obtenus, lorsque la technique est associée à des mesures de réduction primaires. Par exemple, une concentration initiale de  $1100 \text{ mg/m}^3$  pourrait être réduite entre 275 et  $770 \text{ mg/m}^3$ , en fonction des conditions de fabrication. Une concentration initiale élevée de  $4000 \text{ mg/m}^3$  pourrait être réduite entre 1000 et  $2800 \text{ mg/m}^3$ .

Dans le document [tm35 SNCR], Vetropack rapporte une réduction de 800 à environ  $200 \text{ mg/m}^3$  à 220 tonnes par jour et une réduction d'environ 60 % à 340 de tonnes par jour. Dans les deux cas, l'échappement d'ammoniac est peu important.

### Aspect financier

Dans un rapport à l'EIPPCB [tm32 Beerkens], des estimations de coûts ont été faites, pour une série de fours. Ces chiffres sont résumés ci-dessous et comparés avec d'autres techniques, dans le paragraphe 4.4.2.9. Les coûts mentionnés ne tiennent pas compte des intérêts ni des amortissements. Les coûts d'investissement sont évalués à plus ou moins 15 %, et les coûts d'exploitation à plus ou moins 30 %.

Capacité tonnes/jour	Volume de gaz $\text{Nm}^3/\text{heure}$	Coûts d'investissement (x 1 000) en euros	Coûts d'exploitation (x 1 000) en euros par an
50 t/j Emballage	6 400	190	23
100 t/j Emballage	11 120	280	28
300 t/j Emballage	23 000	450	73
450 t/j Emballage	33 350	575	100
600 t/j Float	70 000	1 350	225

**Tableau 4.12 : Coûts de la SNCR**  
[tm32 Beerkens]

### Applicabilité

En principe, la technique est applicable à toutes les activités de verrerie, pour les installations nouvelles ou déjà existantes. La SNCR suppose des coûts d'investissement moins lourds que la SCR et a besoin de moins de place, ce qui la rend plus intéressante pour les procédés où l'espace est limité. Par ailleurs, la technique peut fonctionner sans épuration de gaz et sans

équipement de dépoussiérage. Dans des conditions correctes de fabrication, la SNCR est plus facile à adapter aux installations déjà existantes que la SCR. Pourtant, la technique a certaines caractéristiques qui limitent son applicabilité, à l'industrie verrière. La plus importante est de savoir si le réactif peut être introduit, en un point du système de gaz brûlés, où la bonne température peut être maintenue, pendant un temps de réaction adéquat. Cet aspect est particulièrement pertinent dans les installations qui existent déjà et pour les fours régénératifs.

Dans les installations existantes, la zone où à la bonne température n'est parfois pas facile à évaluer, ou peut se trouver dans une position où le courant gazeux empêche un bon mélange avec le réactif. Dans de nombreux cas, ces problèmes peuvent être résolus ou atténués. Mais les coûts peuvent s'en ressentir sensiblement, ainsi que l'efficacité de la réduction des NOx. Dans les fours régénératifs, la plage de température est correcte à l'intérieur des régénérateurs et l'injection satisfaisante d'ammoniac est alors très difficile. On peut pallier le problème en installant des régénérateurs en deux blocs et en injectant l'ammoniac dans le raccordement. Ce type d'équipement peut être ajouté dans la conception d'un nouveau four. Mais, pour les installations existantes, la séparation des régénérateurs entraînerait des coûts substantiels et ne peut être réalisée qu'au moment d'une réfection.

En pratique, il est peu probable qu'on puisse utiliser la SNCR, dans les fours régénératifs existants. Les coûts et les difficultés annexes conduiraient souvent à opter pour d'autres moyens de réduire les émissions de NOx. Dans les fours plus petits à récupération, les coûts liés à la SNCR, sont assez élevés et, dans de nombreux cas, l'industrie préférera privilégier des mesures de prévention d'un meilleur rapport coût-efficacité, bien que cela dépende du niveau de performance requis.

#### Autres aspects annexes

##### Avantages :

- Si les conditions requises sont présentes, la SNCR permet d'obtenir une bonne réduction des NOx.
- Faible coût d'investissement par rapport à d'autres solutions.
- Pas besoin de catalyseur.
- Besoin énergétique réduit.

##### Inconvénients :

- L'injection d'ammoniac, à la bonne température, est essentielle, mais quelquefois difficile ou impossible à réaliser, notamment pour les fours régénératifs.
- En dehors de la plage de température de service, des émissions de NH<sub>3</sub> ou une augmentation de Nox, sont possibles.
- Le mélange uniforme est important mais peut être difficile à réaliser.
- Consommation et émission d'ammoniac dont le stockage et la manutention sont des sujets d'inquiétude pour l'environnement et la sécurité.
- Craintes en ce qui concerne une éventuelle détérioration des matériaux réfractaires des régénérateurs.

**Tableau 4.13 : Principaux avantages et inconvénients de la SNCR**

#### Exemples d'installations

Vetropack AG, Bülach, Suisse – Verre d'emballage.  
PPG Fresno, Californie, USA- Verre float.  
Schott Glas, Mainz, Allemagne – Verres spéciaux.

Henkel, Düsseldorf, Allemagne – Verre sodocalcique.

Osram, Augsburg, Allemagne – Verre d'éclairage.

### 4.4.2.9 Comparaison des coûts des techniques de réduction des NOx

Ce paragraphe compare les coûts des principales techniques de réduction des Nox, décrites dans ce chapitre, ainsi que les coûts d'un système de filtration et d'un système de lavage des gaz acides. Les informations présentées ici, sont basées en grande partie, sur un rapport préparé pour l'EIPPCB [tm32 Beerkens]. De nombreuses questions spécifiques à une installation ne peuvent pas être traitées dans un rapport de ce type, par exemple :

- Le prix de l'énergie, surtout l'électricité.
- La fiscalité.
- Les coûts des matières, calcaire, ammoniac, etc.
- Les programmes d'incitation, proposés par les états membres.
- Les détails des négociations entre fournisseurs et industriels.
- Les coûts d'élimination des effluents solides ou liquides.
- L'infrastructure des installations.

Les coûts d'une technique donnée peuvent également varier énormément, d'un secteur à un autre, selon les types de verre et les différentes tailles des fours. Il n'est pas possible, dans le cadre de ce document, de traiter toutes les configurations possibles de taille et de type de verre. D'autre part, dans certains secteurs de la verrerie, très peu d'informations sont dans le domaine public. Les données présentées ici ne sont donc fournies qu'à titre indicatif, sur la base des informations disponibles, qui ont pu faire l'objet d'une certaine interprétation et extrapolation. Il faudrait beaucoup plus de temps et d'informations, pour mener une étude plus approfondie et cela n'est pas jugé possible, dans le cadre de ces travaux.

Cinq cas types sont examinés et ce sont tous des fours pour verre sodocalcique, pour lesquels, dans la mesure du possible, on a tenté de proposer des informations, pour un four continu de fil de silionne. Ces exemples ont été choisis parce qu'ils représentent la plus grande partie de la production verrière et que la plupart des informations sont disponibles, pour des fours de ce type. Les exemples donnés concernent diverses lignes de produits. Mais il convient de rester prudent lorsque des comparaisons directes sont faites, avec d'autres types de produits de verre. Par exemple, un four pour verre d'emballage de 100 tonnes/jour, avec 48 % de calcin, sera beaucoup plus petit qu'un four pour fil de silionne de 100 tonnes/jour. On a donc mentionné, dans les exemples, les volumes des gaz brûlés, afin de faciliter la comparaison avec les autres secteurs.

Voici les cinq cas :

1. Production de verre d'emballage, 50 tonnes de verre fondu/jour, récupération.
2. Production de verre d'emballage, 100 tonnes de verre fondu/jour, récupération.
3. Production de verre d'emballage, 300 tonnes de verre fondu/jour, régénération.
4. Production de verre d'emballage, 450 tonnes de verre fondu/jour, régénération.
5. Production de verre float, 600 tonnes de verre fondu/jour, régénération.

Les techniques étudiées sont les suivantes :

1. Systèmes de combustion anti-NOx et réglage de la combustion anti-NOx.
2. SCR, à l'exception des coûts de traitement préalable des gaz de fumée, c'est-à-dire sans le filtre et l'épurateur.
3. SNCR.

4. Technique 3R Pilkington, hors coûts pour l'octroi du brevet, avec et sans dotation pour modifications des réfractaires des régénérateurs.
5. Chauffage 100 % oxycombustion.
6. SCR avec traitement préalable des gaz de fumée, c'est-à-dire avec le filtre et l'épurateur.
7. Filtre + épurateur pour réduction des émissions de particules et de gaz acides.

Les coûts de la SCR, avec et sans traitement préalable des gaz, sont donnés pour montrer ce que peuvent être les coûts d'une application, où le filtre et l'épurateur sont déjà installés. Toutefois, il est évident que la mise à niveau entraînera des dépenses. Les coûts d'investissement et d'exploitation du filtre et de l'épurateur, sont donnés à titre indicatif, pour les filtres à manche et les précipitateurs électrostatiques, pour les limites de confiance indiquées.

Le tableau ci-dessous, présente les coûts d'investissement approximatifs, plus ou moins 15 %, des diverses techniques des exemples. D'autres informations sont fournies, dans les sections spécifiques de ce chapitre. Les coûts n'incluent pas les intérêts et autres dépenses, liées à l'investissement qui, pour la production d'oxygène, sont incluses dans les coûts d'exploitation. Tous les chiffres sont en euros. Le montant négatif, pour l'oxycombustion est dû aux économies réalisées, sur le système de récupération ou de régénération. Comme souligné au paragraphe 4.4.2.5, pour les systèmes de régénération, ces économies s'appliquent uniquement aux nouvelles installations, et peuvent s'annuler dans une certaine mesure, si le four a besoin d'une plus grande quantité de réfractaires plus chers. Les coûts du procédé 3R varient selon qu'on envisage ou non de réparer les régénérateurs. Cette question est traitée au paragraphe 4.4.2.6.1. En règle générale, aucune réparation n'est prévue pour les installations de verre float. Mais elles sont possibles, pour les fours de verre d'emballage et de gobeletterie, bien que ce soit rare.

Coûts d'investissement en euros	50 tpj	100 tpj	300 tpj	450 tpj	600 tpj
	emballage	emballage	emballage	emballage	float
SCR	430 000	615 000	1 000 000	1 300 000	1 800 000
SNCR	190 000	280 000	450 000	575 000	1 350 000
Anti-NOx	100 000	100 000	180 000	200 000	550 000
Oxycombustion	- 200 000	- 300 000	- 1 350 000	- 1 750 000	- 4 800 000
3R y compris réparations, etc.			270 000	350 000	680 000
3R hors réparations			140 000	170 000	260 000
SCR + filtre	990 000	1 500 000	2 420 000	3 100 000	4 550 000
filtre + épurateur	565 000	875 000	1 420 000	1 820 000	2 750 000
Nm <sup>3</sup> gaz brûlés/h	6 400	11 120	23 000	33 350	70 000

**Tableau 4.14 : Coûts d'investissement pour les techniques de réduction**  
[tm32 Beerkens]

Le Tableau 4.15 ci-dessous présente les coûts d'exploitation approximatifs, plus ou moins 30 %, des diverses techniques pour les exemples donnés. D'autres informations sont proposées, dans les sections spécifiques de ce chapitre. Dans ces coûts figurent les réactifs, ammoniac, calcaire, la surveillance des gaz de fumée, la maintenance et les dépenses d'énergie supplémentaires pour les ventilateurs, etc. Pour la fusion à l'oxygène, le coût de l'oxygène, y compris l'investissement et l'énergie, est basé sur 0,055 euros/m<sup>3</sup>, pour les petits utilisateurs et 0,04 euros/m<sup>3</sup>, pour les gros utilisateurs. Ces chiffres sont comparables à ceux donnés dans [tm6 NOx Ind. du Verre]. Les coûts prennent également en compte l'économie d'énergie, prévue avec la fusion à l'oxygène.

On a appliqué des chiffres de 25 à 30 %, pour les fours à récupération et de 10 à 15 %, pour les fours régénératifs.

euros x 1000	50 tpj	100 tpj	300 tpj	450 tpj	600 tpj	100 tpj
	emballage	emballage	emballage	emballage	float	fibre
SCR	42	64	123	166	330	100
SNCR	23	28	73	100	225	23 à 35 <sup>(1)</sup>
Anti-NOx	15	21	35	46	72	21
3R avec réparations			185	255	285	
3R sans réparations			106	156	267	
Oxygène	135	190	530	1 110	1 900	227
SCR + filtre	74	108	200	260	470	139
Filtre + épurateur	37	53	89	116	186	64

**Tableau 4.15 : Coûts d'exploitation annuelle pour les techniques de réduction**

[tm32 Beerkens]

<sup>(1)</sup> Estimation

Le tableau ci-dessous présente les montants totaux, pour chaque technique, y compris amortissement de 10 ans et un intérêt à 7 %, en euros par tonne de verre.

Tonnes de verre fondu/jour	m <sup>3</sup> gaz brûlés/h	Euros/tonne de verre							
		Anti-NOx	SCR	SNCR	3R + réparat.	3R sans réparat.	Oxycombustion	SCR + filtre épurat.	filtre+ épurat.
50	6 400	2,36	7,01	3,65	3,96	3,18	6,17	14,25	7,97
100	11 120	1,34	4,98	2,35	2,87	2,20	4,06	10,2	5,52
300	23 000	0,72	2,83	1,49	2,28	1,35	5,05	5,75	3,01
450	33 350	0,57	2,44	1,3	2,02	1,23	5,04	4,92	2,68
100 fibre	12 000	1	5	1,5 à 2	4 à 4,5	2,50	7 à 8	13	9
600 float	70 000	0,83	2,99	2,16	1,91	1,50	5,16	5,78	3,06

**Tableau 4.16 : Coûts spécifiques des techniques de réduction en euros/tonne de verre**

[tm32 Beerkens]

La réduction des NOx est basée sur un niveau initial de NOx de 1600 mg/m<sup>3</sup>, pour les fours à récupération, et de 2000 mg/m<sup>3</sup>, pour le verre float, ainsi que sur les réductions suivantes selon la technique : SCR 80 %, SNCR 50 %, anti-NOx 50 %, 3R 65 %, et oxycombustion 80 %, en masse. Les niveaux de réduction, pour la SNCR, et en particulier par le procédé 3R, peuvent être supérieurs, jusqu'à 80 % pour le 3R.

Tout le monde sait qu'il est difficile de prévoir les coûts de la fusion à l'oxygène, qui peuvent énormément varier, en fonction des économies d'énergie réalisées, et du prix de l'oxygène. Par exemple, ces coûts sont calculés, avec une réduction d'énergie de 25 à 30 %, pour les fours à récupération. Dans d'autres secteurs, où on utilise beaucoup moins de calcin, elle peut être de 50 %. De même, selon les négociations qui ont pu être menées, par une installation en particulier, le prix de l'oxygène au m<sup>3</sup>, peut être nettement inférieur. Cela est vrai notamment, lorsque l'installation est équipée de plusieurs fours. Le tableau ci-dessous donne une idée des énormes écarts de coût, par tonne de verre, qu'on peut rencontrer, pour les deux limites



inférieure et supérieure possibles. D'autres facteurs économiques peuvent également avoir leur importance, dans le choix de la fusion à l'oxygène. Ils sont développés au paragraphe 4.4.2.5.

Tonnes/jour de verre fondu	Surcoûts /tonne de verre fondu Oxygène 0,03 euros/m <sup>3</sup>	Surcoûts /tonne de verre fondu Oxygène 0,06 euros/m <sup>3</sup>
50	- 0,47	7,5
100	- 0,55	6,4
300	2,5	8,7
450	2,5	8,6
600	2,3	10,8

**Tableau 4.17 : Coûts de la fusion à l'oxygène, euros/tonne de verre, pour deux prix d'oxygène [tm32 Beerkens]**

### 4.4.3 Oxydes de soufre, SO<sub>x</sub>

La dénomination oxydes de soufre, SO<sub>x</sub>, englobe le dioxyde de soufre, SO<sub>2</sub>, et le trioxyde de soufre, SO<sub>3</sub>, exprimé en équivalent de SO<sub>2</sub>. Le dioxyde de soufre est de loin l'oxyde de soufre le plus fréquent, dans l'industrie du verre, et l'analyse qui suit portera presque entièrement sur cette espèce. En dessous de 200°C environ, le SO<sub>3</sub> se trouve habituellement sous la forme d'une brume ou d'une vapeur acide. Les deux principales sources d'émission des oxydes de soufre sont l'oxydation, dans les combustibles et la décomposition/oxydation, des composés soufrés, dans les matières premières de la charge.

La rétention des composés soufrés, par le verre est normalement faible, < 0,35 %, sous forme de SO<sub>3</sub>, dans la plupart des verres industriels, et en général la plus grande partie du soufre, entrant dans le four est rejetée à l'atmosphère sous forme de SO<sub>x</sub>. Une certaine proportion des SO<sub>x</sub>, dans les effluents gazeux, va réagir avec d'autres espèces, pour produire des sulfates, qui se condensent, pour former des poussières. La quantité de sulfate, dans les poussières, varie selon le type de verre. Pour le verre sodocalcique, elle est d'environ 98 %. La question est aminée plus en détail au paragraphe 4.4.1.

Dans les fours électriques, les émissions de SO<sub>2</sub> ont tendance à être très basses et ne sont produites que par la décomposition des matières premières. Dans les cubilots de laine de roche, il y a une atmosphère globalement réductrice et le soufre, contenu dans les matières premières et le combustible, est rejeté surtout sous forme de SO<sub>x</sub>, et de sulfure d'hydrogène, H<sub>2</sub>S. Dans les installations de l'UE, les déchets gazeux sont habituellement traités, dans un dispositif de post-combustion qui oxyde le H<sub>2</sub>S en SO<sub>2</sub>.

#### 4.4.3.1 Sélection du combustible

Dans les installations fonctionnant au fioul, la principale source de SO<sub>x</sub> est l'oxydation du soufre dans le combustible. La quantité de SO<sub>x</sub>, issu des matières de la composition, varie selon le type de verre. Mais en général, lorsqu'il y a brûlage de fioul, les émissions de SO<sub>x</sub>, issues du fioul, dépassent celles issues de la composition. Le moyen le plus évident de réduire les émissions de SO<sub>x</sub>, est de réduire la teneur en soufre, dans le combustible. Il existe plusieurs qualités de fioul, selon sa teneur en soufre, <1 %, <2 %, <3 % et >3 %. Pour l'essentiel, le gaz naturel ne contient pas de soufre. Certains fours de verrerie en Europe, utilisent du fioul ayant une teneur en soufre supérieure à 3,5 %. Mais dans la plupart des états membres, il est rare d'utiliser du fioul, contenant plus de 2 % de soufre. Afin d'améliorer le contrôle de l'acidification, dans l'Union européenne, des discussions sont en cours actuellement, sur les mesures à prendre, pour limiter le soufre dans le fioul à 1 %, ou la réduction équivalente suivante. Le tableau ci-dessous présente les émissions caractéristiques de SO<sub>x</sub>, issues du verre

sodocalcique, selon la qualité du combustible. Ces chiffres sont donnés à titre indicatif uniquement, et les valeurs réelles peuvent avoir des écarts très importants.

Combustible	SOx, de formule SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>
Gaz naturel	300 à 1000
Fioul à 1 % de soufre	1 200 à 1 800
Fioul à 2 % de soufre	2 200 à 2 800

**Tableau 4.18 : Emissions indicatives de SOx dans les déchets gazeux de verrerie pour différents combustibles**

L'industrie verrière utilise de plus en plus le gaz naturel. Par exemple, presque tous les fours de laine de verre, à combustible fossile, des fours de fil de silionne et environ 50 % de tous les fours de verre d'emballage, fonctionnent au gaz naturel. Le principal facteur déterminant est cependant la différence de prix entre gaz et fioul. L'expérience générale de l'industrie en la matière montre que le passage au gaz naturel se traduit par des émissions de NOx plus élevées, entre 25 et 40 %. Mais grâce à l'acquisition de nouvelles connaissances la marge se resserre. Cette question est examinée plus en détail au paragraphe 4.4.2.1, sélection du combustible.

Le passage à un combustible, contenant moins de soufre, n'entraîne pas une augmentation des coûts, à l'exception du prix de celui-ci. Le passage au chauffage au gaz nécessite le changement des brûleurs, un dispositif d'amenée du gaz aux brûleurs et une modification des orifices d'admission, des brûleurs et du combustible. Certaines installations n'ont pas d'accès à un approvisionnement en gaz naturel. Les prix des divers combustibles varient dans le temps et d'un état membre à un autre. Mais, d'une manière générale, une qualité de fioul, avec une teneur en soufre diminuée de 1 %, correspond à une hausse de prix de 5 %. Dans la majorité des états membres, le gaz naturel est plus cher que le fioul. Mais dans certains autres, Royaume-Uni - 1998, il peut être nettement moins cher. En 1998 en France, les divers prix de l'énergie, fixés sur une base 100, étaient l'électricité 522, le gaz naturel 122, le fioul 1 % de soufre 100, le fioul 2 % de soufre 94, et le fioul 3,5 % de soufre 87. Au Royaume-Uni en 1998, le gaz naturel était entre 20 et 30 % moins cher que le fioul à 2 % de soufre.

Le tableau ci-dessous présente les variations de coût des diverses sources d'énergie, sur la base d'estimations au 1<sup>er</sup> janvier 1998. Les écarts de chiffres sont exprimés avec une moyenne de 100, pour chaque type d'énergie, et les prix moyens réels sont également indiqués.

	Fioul lourd	Gaz naturel	Electricité
Moyenne – base 100 coût moyen réel euros/GJ	100 300 euros/GJ	100 370 euros/GJ	100 1 310 euros/GJ
Maximum	122 Pays Bas	150 Suède	131 Autriche
Minimum	72 Belgique	80 Royaume-Uni	64 Finlande
Maximum/Minimum	1,69	1,87	2,04
Moyenne UE, Base 100 = fioul lourd	100	123	436

**Tableau 4.19 : Variations des prix de l'énergie dans l'Union européenne – source COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE**

Les cubilots à vent chaud, utilisés dans la production de laine de roche, sont chauffés au coke. La variation de la teneur en soufre, dans le coke utilisé par le secteur, est assez faible, entre 0,6 % et 0,9 %, et dépend de la source. Le SO<sub>2</sub> issu du coke représente 30 à 70 % des émissions totales, en fonction de l'emploi de laitier et des déchets agglomérés au ciment. Le transport du coke, à faible teneur en soufre, peut être cher et, à moins que l'usine ne soit située à proximité d'une source d'approvisionnement, il est probable que la réduction des émissions sera disproportionnée par rapport au coût. Le secteur n'utilise pas d'autres produits à forte teneur en soufre, comme le coke de pétrole et, dans de nombreux cas, la teneur en soufre du coke a déjà été réduite dans la limite de ce qui est économiquement possible.

#### 4.4.3.2 Formule de la composition

Dans la fabrication traditionnelle du verre, les sulfates sont la principale source d'émission de Sox, issus des matières premières. Les sulfates sont les agents d'affinage, les plus souvent utilisés, et sont également des agents oxydants importants. Le sulfate le plus répandu est le sulfate de sodium, qui se dissocie à la fusion pour donner des SO<sub>x</sub> gazeux, et du Na<sub>2</sub>O qui est incorporé au verre. On utilise également beaucoup les sulfates de potassium et de calcium. Dans la plupart des fours de verrerie modernes, les taux de sulfates, dans la composition ont été réduits au minimum possible, qui varie selon le type de verre. Les questions concernant la réduction des sulfates, dans la composition sont examinées au paragraphe 4.4.1.1 et les questions liées au recyclage des poussières, issues du filtre/précipitateur, au paragraphe 4.4.3.3. Les émissions, associées aux agents d'affinage et oxydants, sont généralement comprises entre 200 et 800 mg/Nm<sup>3</sup>, soit de 0,2 à 1,4 kg/tonne de verre fondu [tm29 Infomil].

Dans la production de laine de roche, l'utilisation dans la composition de laitier et de briquettes agglomérées au ciment, constitue une source importante d'émission de SO<sub>2</sub>, en plus du coke. Le laitier contient en général entre 0,6 et 1,5 % de soufre en poids, et une très grande partie du soufre sera rejeté sous forme de H<sub>2</sub>S et de SO<sub>2</sub>. En présence d'un dispositif de post-combustion, les émissions seront largement oxydées en SO<sub>2</sub>. Il existe peu de possibilités d'acheter du laitier, avec de faibles teneurs en soufre, et très peu de fournisseurs sont assez proches pour que la distance de transport reste économique.

Le pourcentage de laitier, dans la composition, varie énormément, de presque 100 %, pour la laine de laitier, à zéro pour beaucoup d'installations normales de laine de roche. Lorsqu'il est utilisé, le laitier constitue en général 30 %, de la composition totale, à l'exception du coke. La seule application où son utilisation est indispensable est la production de fibres blanches, pour des applications comme la projection de fibres au pistolet ou des panneaux de plafond. Ces applications ne représentent qu'un petit pourcentage de la production totale du secteur. Mais certaines usines ne fabriquent que ces produits. Pour une usine utilisant environ 30 % de laitier dans la composition, les émissions non traitées de SO<sub>2</sub>, sont de l'ordre de 2 à 3 fois supérieures à celles d'une composition sans laitier. Au moment de la rédaction de ce document, on estime [tm26 EURIMA] que 30 % environ des installations européennes de laine de roche, utilisent du laitier de haut fourneau.

L'intérêt de supprimer l'emploi de laitier, pour les émissions de SO<sub>2</sub>, est évident. Pourtant, l'utilisation de laitier a aussi ses avantages :

- Diminution de la consommation d'énergie et réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues au remplacement partiel du calcaire par du laitier. La consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> sont entre 5 et 15 % inférieures à celles d'une charge basalte-calcaire.
- La charge contient moins de fer, ce qui réduit la fréquence des débouchages nécessaires et permet d'améliorer le rendement. On observe moins d'interruptions dans la production et une légère réduction des déchets solides.
- Dans certains cas, l'emploi de laitier permettrait d'améliorer les propriétés de fibrage de la fonte, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité du procédé et à réduire les quantités de déchets en réduisant la charge d'injection.

- Le laitier de haut fourneau est un déchet qui, s'il n'est pas utilisé, sera probablement éliminé dans un site d'enfouissement. De plus, il remplace la roche naturelle et permet de diminuer la demande en matériaux de carrière.
- Le laitier est souvent moins cher que les matières qu'il remplace.

Il est possible que la plupart des avantages, décrits ci-dessus, puissent être obtenus par une augmentation de l'utilisation des déchets de fabrication recyclés. Une évaluation par site de l'impact de l'emploi de laitier, sur la pollution de l'ensemble de l'environnement, peut être appropriée dans certains cas. Dans le cadre d'une évaluation qualitative générale, il est peu probable que les bénéfices, liés à l'utilisation de laitier l'emportent sur les émissions générées. Si le laitier est nécessaire, pour la couleur du produit, son usage peut être minimisé par l'emploi de déchets internes recyclés. Avec la mise en œuvre de mesures secondaires de réduction des Sox, le bilan de l'emploi de laitier, pour l'environnement pourrait être modifié.

Les déchets de briquettes, agglomérées au ciment, contiennent en moyenne 0,16 % de soufre et constituent jusqu'à 45 % de la composition, ce qui donne environ 75 % de soufre, issu du coke à 0,7 % de soufre. Si on fait une comparaison entre le laitier à 1 % de soufre, représentant 30 % de la composition et les briquettes à 0,16 % de soufre, pour 45 %, on constate que le laitier apporte trois fois plus de soufre que les briquettes. Des études sont en cours pour minimiser la teneur en ciment des briquettes, ou pour le remplacer entièrement par d'autres types de liants.

### 4.4.3.3 Epuration par voie sèche ou semi-sèche

#### Description de la technique

Les principes de réaction de l'épuration, par voie sèche, et de l'épuration par voie semi-sèche, sont les mêmes. La matière réactive, l'absorbant, est introduite et dispersée dans les effluents gazeux. Cette matière réagit avec les espèces Sox, pour former une substance solide, qu'il faut éliminer des effluents gazeux, à l'aide d'un précipitateur électrostatique, ou d'un filtre à manches. Les absorbants, choisis pour éliminer les Sox, sont également efficaces, pour éliminer d'autres gaz acides, notamment les halogénures, HCl et HF, mais aussi certains composés de sélénium. Dans certaines applications, l'absorbant est injecté directement dans le conduit des gaz brûlés. Mais les techniques sont nettement plus efficaces avec une tour d'absorption, traitement par voie sèche, ou une chambre de réaction, traitement par voie semi-sèche.

Dans le traitement à sec, l'absorbant est une poudre sèche, en général  $\text{Ca OH}_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$  ou  $\text{Na}_2 \text{CO}_3$ , à laquelle on peut ajouter de l'air, pour faciliter la dispersion. Dans le traitement par voie semi-sèche, l'absorbant,  $\text{Na}_2 \text{CO}_3$ ,  $\text{CaO}$  ou  $\text{Ca OH}_2$ , est ajouté sous la forme d'une suspension ou d'une solution et l'évaporation d'eau refroidit le courant gazeux. Dans d'autres applications industrielles, le traitement par voie semi-sèche, décrit ici, est souvent appelé semi-humide. Dans ce document, on parle exclusivement de traitement semi-sec, car c'est le terme usuel employé par l'industrie du verre.

On rencontre plus fréquemment le traitement à sec, dans la verrerie, que le traitement par voie semi-sèche. En général, le taux de réduction des polluants dépend en grande partie de la température, mais dans des proportions très différentes, selon les constituants des effluents gazeux. Par ailleurs, les polluants gazeux ont une réactivité différente, selon les divers absorbants et des réactions concurrentes se produisent entre les différentes espèces, notamment si le rapport entre réactif et gaz acides est relativement bas. Les différents taux d'absorption dépendent donc de la quantité spécifique de l'absorbant, de la composition des effluents gazeux polluants, mais également de l'humidité et teneur en oxygène, et de la température de la réaction. En outre, les taux d'absorption dus à la nature de la réaction gaz/solide, dépendent en grande partie de la zone spécifique active de l'absorbant, et du temps de séjour. Il est donc souvent nécessaire d'avoir une proportion d'absorbant supérieure au rapport stœchiométrique.

La quantité spécifique d'agent absorbant est souvent exprimée par le rapport molaire, qui peut être défini de deux manières :

RM1= Rapport molaire de l'absorbant sur les SOx réduits

RM2= Rapport molaire de l'absorbant sur l'apport total de SOx.

Avec les précipitateurs électrostatiques, on peut utiliser le traitement à sec ou le traitement par voie semi-sèche. Mais avec les filtres à manche, il faut refroidir les effluents gazeux. Le procédé d'épuration le plus répandu dans la verrerie est le traitement par voie sèche, associé à un précipitateur électrostatique, l'absorbant étant du  $\text{Ca(OH)}_2$  et la température de service étant de 400°C. On utilise du  $\text{Ca(OH)}_2$  car il permet d'obtenir un taux de réduction relativement correct à cette température et parce qu'il est assez facile d'atteindre 400°C, dans le courant gazeux, sans refroidissement et que le précipitateur électrostatique fonctionne dans cette plage de température.

Avec les filtres à manche, la température doit être abaissée à moins de 200°C. Le refroidissement est effectué par un échangeur thermique ou de l'air de refroidissement. L'évaporation d'eau dans le traitement, par voie semi-sèche, contribue aussi à ce refroidissement. Avec la baisse de température, les taux de réduction pour certaines espèces, en particulier HCl et  $\text{SO}_2$ , diminuent considérablement et sont au minimum dans la plage comprise entre 200 et 280°C. A des températures inférieures à 200°C, plage de service optimale pour les filtres à manche, les taux de réduction augmentent et permettent d'obtenir de bons résultats, pour la plupart des polluants, parfois même meilleurs qu'à 400°C.

### Performances environnementales

Comme on vient de le voir, les réductions obtenues, avec ces techniques, dépendent d'un certain nombre de facteurs comme la température des effluents gazeux, la quantité et le type d'absorbant ajouté, ou plus précisément le rapport molaire entre réactif et polluants, et la dispersion de l'absorbant. Le tableau et les chiffres ci-dessous donnent une estimation des efficacités obtenues, avec divers absorbants et traitements. Les chiffres réels varient d'un cas à un autre. Des valeurs supérieures et inférieures ont été enregistrées.

En raison des différents taux d'absorption, observés dans le gâteau de filtration, et des différentes températures de services, associées au PE et aux filtres à manche, des chiffres distincts sont donnés, pour les deux types de filtres, dans le tableau 4.20. [tm41 VDI2578]

Polluant	PE		Filtre à manches
	~ 400°C	200 – 280°C	130 – 240°C
$\text{SO}_2$	50 %	10 %	10 %
$\text{SO}_3$	80 %	90 %	95 %
HCl	70 %	35 %	80 %
HF	95 %	95 %	95 %
$\text{SeO}_2$	90 %	70 %	90 %

**Tableau 4.20 : Pouvoirs d'absorption à sec pour le  $\text{Ca(OH)}_2$  (chiffres indicatifs)**

Plus généralement, le document [tm48 ADEME SOx] donne les résultats suivants pour le traitement à sec avec le  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Température	Taux de réduction des SOx	
	130 - 140°C	170 - 180°C
Rapport molaire RM1 Ca/S =1	30 %	22 %
Rapport molaire RM1 Ca/S =2	50 %	40 %
Rapport molaire RM1 Ca/S =3	70 %	55 %

**Tableau 4.21 : Taux de réduction des Sox, pour l'épuration par voie sèche avec du  $\text{Ca(OH)}_2$** 

Un taux de réduction de 65 % a été enregistré dans le cas d'un four à verre float, utilisant l'épuration par voie sèche plus un PE, avec un rapport molaire RM1 de 4,4 et 180 kg/h de  $\text{Ca(OH)}_2$ , à une température d'environ 400°C. Toutes les poussières sont recyclées dans le four, Cf. Annexe 1, Section 8.2. Four FG6.

Les applications, du traitement à sec avec du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  comme absorbant, sont résumées dans le tableau ci-dessous, pour la plage de température comprise entre 300°C et 400°C. Encore une fois, les fourchettes des taux de réduction dépendent en grande partie de la température et de la quantité d'absorbant.

Polluant	Taux de réduction des SOx
$\text{SO}_2$	< 50 %
$\text{SO}_3$	90 %
HCl	50 à 75 %
HF	10 à 40 %
$\text{SeO}_2$	30 à 60 %

**Tableau 4.22 : Taux de réduction des SOx pour l'épuration par voie sèche avec du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$** 

Les résultats des expériences les plus récentes, avec du  $\text{NaHCO}_3$  comme absorbant, commencent à être publiées. Les taux indicatifs d'absorption peuvent être considérés comme très bons, notamment pour la plage inférieure de température, avec jusqu'à 90 % d'élimination possible des SOx.

Seuls quelques fours sont équipés de dispositifs d'épuration, par voie semi-sèche. En association avec un filtre à manches et l'application d'une solution de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , comme absorbant, des taux de réduction très élevés ont été enregistrés. Ces résultats sont synthétisés, dans le tableau ci-dessous. La réduction de 95 % de  $\text{SO}_2$  est le maximum possible. Pour une activité industrielle ordinaire, la fourchette de réduction obtenue est plutôt comprise entre 80 et 90 %.

Polluant	Taux de réduction des SOx
$\text{SO}_2$	90 à 95 %
HCl	> 90 %
HF	> 85 %
$\text{SeO}_2$	> 90 %

**Tableau 4.23 : Taux de réduction des SOx pour une épuration par voie semi-sèche avec une solution de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$** 

Plus généralement, dans d'autres applications industrielles, le document [tm48 ADEME SOx] donne les résultats suivants, pour le traitement par voie semi-sèche, avec du  $\text{Ca(OH)}_2$ . On rencontre cependant bien que rarement des applications semi-sèches, avec du calcaire dans l'industrie du verre.

	Taux de réduction des SOx
Rapport molaire RM1 Ca/S =1	80 %
Rapport molaire RM1 Ca/S =1.5	90 %



Rapport molaire RM1 Ca/S =2	92 %
-----------------------------	------

**Tableau 4.24 : Taux de réduction des SOx pour l'épuration par voie demi-sèche avec du Ca(OH)<sub>2</sub>**

Un effet sur les émissions de NOx a également été signalé, lorsque le traitement par voie semi-sèche utilise du Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou du NaHCO<sub>3</sub>. Pour le NaHCO<sub>3</sub>, la fourchette optimale est comprise entre 120 et 160°C, et l'efficacité de la réaction dépend du rapport molaire SO<sub>2</sub>/NOx. Le taux de réduction est favorisé par un rapport SO<sub>2</sub>/NOx élevé. A des températures supérieures, le taux de réduction des émissions de NOx est beaucoup plus faible. Dans des conditions normales caractéristiques de l'industrie verrière, on a pu seulement observer un effet modéré sur les taux de réduction des NOx.

En résumé, la réduction obtenue dépend d'un certain nombre de paramètres, liés au traitement et à l'absorbant. Dans des conditions favorables, on peut obtenir des taux de réduction élevés, dans le meilleur des cas jusqu'à 95 %, pour les SOx totaux de formule SO<sub>2</sub>. Le taux de réduction de SO<sub>3</sub> est généralement supérieur à 80 %.

La concentration réelle des émissions, ou masse/tonne de verre, dépend de la concentration à l'admission et de l'efficacité de la désulfuration. Ces concentrations à l'admission dépendent elles-mêmes des facteurs suivants :

1. Apport de soufre par le combustible
2. Type de verre, couleur, état d'oxydation et teneur en soufre
3. Prescriptions techniques pour l'affinage, la qualité et la quantité de sulfates
4. Quantité et type de calcin, interne ou externe, teneur en soufre et en contaminants
5. Composition des poussières de filtration et taux de recyclage
6. Conditions de combustion, proches de la combustion stœchiométrique pour la réduction des Nox, par des mesures primaires, risque d'augmentation de la teneur en SO<sub>2</sub> dans les déchets gazeux bruts.

Une réduction globale des émissions nécessite toutefois l'élimination, par recyclage interne ou externe ou traitement en décharge contrôlée, des effluents solides, produits par les poussières sulfatées. Dans le cas d'une décharge contrôlée, le coût du traitement peut être estimé entre 0,5 et 1,5 euro/tonne de verre, selon le contexte.

En pratique, le recyclage complet des poussières de filtration, y compris ces déchets sulfatés, est très souvent considéré comme un choix économique, acceptable pour l'environnement, lorsqu'il est techniquement possible. Dans ce cas, la réduction globale des émissions de SOx est limitée, en raison de facteurs liés au bilan massique, à une réduction à la source, obtenue en remplaçant le sulfate dans les matières premières, par les poussières de filtration. Il s'agit bien sûr d'un complément à d'autres mesures primaires appropriées, destinées à réduire l'apport global de soufre dans la fonte, en optimisant les teneurs en soufre, dans toutes les substances de base, y compris le calcin, dans la mesure du possible.

Ainsi, pour réduire les rejets de gaz acides, il peut être nécessaire d'envisager une voie externe d'élimination, pour une partie des matières recueillies. Un choix de recyclage externe ou de réutilisation, serait préférable à l'enfouissement dans une décharge. Toutefois, au moment de la rédaction de ce document, aucune réutilisation externe économiquement viable n'a été constatée. La détermination de ce qui constitue la meilleure protection de l'environnement dans son ensemble est souvent spécifique à un site et peut impliquer d'avoir à envisager l'élimination d'effluents solides. Dans ce cas, un bilan soufré sera primordial, pour déterminer les niveaux d'émission correspondant à la MTD.

Avec le recyclage des poussières de filtration, en circuit fermé, les niveaux d'émission de Sox, enregistrés aujourd'hui, sont généralement compris entre 200 et 800 mg/Nm<sup>3</sup>, pour un chauffage au gaz naturel et entre 800 et 1600 mg/ Nm<sup>3</sup>, avec un chauffage au fioul à 1 % S, en

fonction des facteurs mentionnés ci-dessus. En particulier pour les verres contenant une grande quantité de calcin recyclé, et dont la capacité d'absorption de soufre est réduite, par exemple les verres pré-réduits, comme certains verres de bouteille verts ou bruns ; les valeurs devraient se situer dans la partie supérieure de la plage. On trouve des exemples, dans l'industrie du verre, où l'efficacité nette de désulfuration est proche de zéro, lorsque les poussières, contenant du soufre sont totalement recyclées. Dans ces cas toutefois, l'objectif principal n'était pas la désulfuration, mais l'élimination du HCl, du HF, métaux et des poussières. Quoiqu'il en soit, même dans ces cas, on peut obtenir des niveaux plus bas, avec la production d'effluents sulfatés à éliminer hors site.

Lorsqu'on envisage une désulfuration dans l'industrie verrière, il est donc important de prendre en compte les éventuels effets défavorables et la mise en péril d'autres objectifs environnementaux. Les objectifs environnementaux les plus importants, en ce qui concerne la réduction de SO<sub>2</sub> sont :

- taux élevés de recyclage du calcin
- minimisation de la production de déchets, par le recyclage interne ou externe des poussières
- récupération de la chaleur
- réduction d'autres émissions atmosphériques

Le recyclage du calcin est un objectif environnemental important, en raison des économies d'énergie, de la réduction des déchets et de la baisse de consommation, des ressources naturelles. Pour le verre d'emballage par exemple, la législation allemande impose un quota de 72 %, pour le recyclage du calcin et ce quota est régulièrement dépassé. Lorsque le calcin utilisé contient plus de soufre que le verre produit, l'excès de soufre peut entraîner une augmentation des émissions de SO<sub>x</sub>. C'est le cas, par exemple, pour les verres pré-réduits verts et bruns, pour lesquels on utilise du calcin mixte de consommation. Celui-ci est parfois la seule source disponible de débris de recyclage, pour les fabricants, et sa teneur en soufre est plus élevée que celle du produit, à cause de la présence de verre oxydé, verre flint, verre plat, certains verres verts, dans le mélange de débris. La rationalisation progressive du ramassage et du tri du verre permettra d'améliorer la situation. Toutefois, le verre coloré oxydé, comme certains verres verts, peut également présenter une teneur plus élevée en soufre, du fait de son état d'oxydation. C'est pourquoi le tri, par couleur pourra être moins efficace lorsque le calcin est constitué d'une grande quantité de ce type de verres.

Le recyclage des poussières de filtration est également un objectif important, pour empêcher la production de déchets. En effet, il implique le remplacement d'une portion du sulfate, contenu dans les matières premières. En principe, les poussières de filtration tiennent lieu d'agent d'affinage, mais peuvent être moins efficaces dans certains cas, et un remplacement total n'est pas toujours possible. En fonction des différents types de verres, couleur, état d'oxydation, etc., l'absorption du sulfate, issu du soufre des poussières de filtration, peut varier et être quelquefois limitée. S'agissant du recyclage total des poussières de filtration, et en tenant compte des variations mentionnées ci-dessus, il convient d'étudier le bilan massique du soufre avec soin, et de concevoir le matériel d'épuration, de manière à pouvoir sélectionner les agents d'épuration.

La majorité des dispositifs installés pour l'épuration des SO<sub>x</sub>, fonctionnent par injection de chaux, à une température d'environ 400°C, c'est-à-dire la température des déchets gazeux, obtenue avec un four régénératif performant. A ces températures, on peut réaliser une réduction des SO<sub>x</sub> d'environ 50 %. Un meilleur taux de réduction des SO<sub>x</sub> peut être réalisé à des températures d'environ 200 °C, et dans une atmosphère humide. Celle-ci est obtenue par l'injection d'un sorbant dissout dans l'eau, en parallèle avec les filtres à manche. Toutefois, cette technologie, par voie semi-sèche, abaisse la température des effluents gazeux, à un niveau qui n'est pas généralement compatible avec une récupération secondaire de chaleur ou pour des applications en aval nécessitant des températures plus élevées, SCR ou préchauffage du calcin. Dans ce cas, il faudrait envisager d'utiliser le traitement classique, ou « vrai », par voie semi-sèche, bien que cette technique ait été peu expérimentée dans l'industrie du verre. C'est

pourquoi une analyse intégrée est indispensable, avant la mise en œuvre de la désulfuration en prenant en compte tous les effets positifs et négatifs, les coûts et les priorités, par exemple politique d'acidification, énergétique, de traitement des déchets, etc.

Il faut noter que des proportions stœchiométriques élevées, d'absorbant de soufre, impliquent que le matériel de dépoussiérage en aval est beaucoup plus sollicité. En pratique, l'amélioration limitée de l'absorption doit être pesée, par rapport aux prescriptions technologiques et à d'éventuels surcoûts, liés à une augmentation de capacité du précipitateur.

### **Aspect financier**

Les coûts des dispositifs d'épuration, associés aux PE et aux filtres à manche, sont donnés dans les Sections 4.4.1.2 et 4.4.1.3. Le bicarbonate de sodium est beaucoup plus cher que les autres absorbants et on l'utilise moins.

Dans le document [tm29 Infomil], une estimation fait ressortir que, pour un débit de 50000 Nm<sup>3</sup>/h avec un PE, les coûts d'investissement sont de 2,5 à 3,5 millions d'euros, plus 150 000 euros/ans, de coûts d'exploitation, hors intérêts et amortissement.

Pour le secteur de la laine de roche, les coûts d'investissement d'un matériel d'épuration à sec, associé à la technique standard des filtres à manche, sont estimés entre 0,6 à 1,4 millions d'euros, pour des installations neuves, et environ 20 % de plus, pour des installations existantes.

### **Applicabilité**

En principe, les techniques sont applicables à toutes les installations, neuves ou existantes, avec des effluents gazeux contenant des substances acides. Etant donné la forte concentration de poussières, il faut prévoir leur élimination. Le traitement à sec est beaucoup plus répandu, dans l'industrie du verre, car il constitue le moyen le plus efficace et économique de respecter les critères techniques et législatifs en vigueur. L'absorbant le plus souvent utilisé est la chaux éteinte, Ca(OH)<sub>2</sub>.

Les principes de ces techniques sont communs, quelle que soit la taille des installations. Il ne faut pas oublier cependant que l'échelle et donc le coût réel, et éventuellement le rapport coût-efficacité, peuvent considérablement varier d'une application à une autre. En particulier, l'expérience de l'épuration, par voie semi-sèche, est limitée dans les petites structures.

### **Autres aspects annexes**

Les techniques sont performantes pour éliminer certains autres polluants gazeux, à savoir les fluorures, les chlorures et certains composés de sélénium. Elles peuvent également avoir un effet sur d'autres émissions acides, mais il n'existe aucune information sur les taux de réduction.

Dans certains exemples récents de l'industrie du verre la mise en place de ces techniques était surtout motivée par la protection des équipements de réduction des poussières ou, dans certains cas, fil de silionne, fritte, etc., par l'élimination des émissions de fluorures. Une exception notable est la production de laine de roche. Dans de nombreux cas, si la réduction des poussières ou des fluorures n'était pas obligatoire, il serait plus économique d'adopter le chauffage au gaz que de mettre en œuvre ces techniques.

Ces techniques produisent une quantité notable de résidus solides. Mais, dans la plupart des applications, ces matières peuvent être recyclées dans le four. Des problèmes peuvent survenir, en particulier avec les fours au fioul qui utilisent de gros pourcentages de calcin. Si l'absorbant utilisé est du carbonate de sodium, il est plus facilement recyclé dans le verre sodocalcique, en raison d'une forte demande de sulfate de sodium et de carbonate de sodium.

Lorsque les pourcentages de calcin sont peu élevés, la quantité de sulfate récupérée sera généralement moins importante que celle requise pour l'affinage, et il peut également être possible d'augmenter la consommation de soufre, issu des poussières recueillies par le verre, c'est-à-dire un pourcentage plus élevé de  $\text{SO}_3$ . D'une manière générale, on observe une diminution des émissions et une réduction de la consommation de sulfate de sodium. Si le taux de sulfate récupéré est supérieur au taux de sulfate nécessaire, dans la composition, des effluents solides sont produits et devront être éliminés hors site. D'un autre côté, si toutes les matières sont recyclées, en plus grandes quantités que ce dont on a besoin, le système devient un circuit fermé, qui atteint un équilibre dynamique, dont les seuls pièges, pour le soufre, sont le verre et les rejets à l'atmosphère. Lorsque les taux de calcin sont élevés, la demande en sulfate en tant qu'agent d'affinage est moins importante et il reste peu de possibilités, pour le verre, d'en absorber davantage. Aussi, à moins d'éliminer une partie des poussières, on observe une augmentation des émissions de  $\text{SO}_x$  et l'intérêt global de la réduction des  $\text{SO}_x$  est beaucoup moins évident. Le problème est particulièrement manifeste dans les verres pré-réduits, contenant de fortes proportions de calcin.

En pratique, si cela devait se produire, les coûts d'élimination des poussières, qui ne peuvent pas être recyclées, peuvent souvent être plus élevés que le coût d'un combustible, contenant moins de soufre, par exemple le fioul, à faible teneur en soufre, ou le gaz naturel. Dans de nombreuses situations, l'industriel choisira donc de changer de combustible, plutôt que de créer un courant d'effluents solides, qu'il faudra éliminer. Une grande différence de prix entre le combustible pauvre en soufre, notamment le gaz naturel, et d'autres combustibles peut décourager d'opter pour ce choix.

Si l'absorbant utilisé est de l'hydroxyde de calcium, on aura une limite, sur la quantité de calcium, qu'il sera possible de recycler, pour la plupart des compositions de verre. Des modifications peuvent normalement être apportées à la formule de la composition, pour compenser l'absence de poussières de filtration. Mais dans les compositions contenant beaucoup de calcin, la possibilité d'adapter la formule est limitée. Dans les compositions contenant beaucoup de calcin, la teneur en calcium peut être supérieure à ce qui peut être toléré, dans le verre et occasionner la production d'effluents solides. Dans un tel cas, une solution peut être le remplacement de l'absorbant par du carbonate ou du bicarbonate de sodium, ou un mélange des différents absorbants.

Dans les régions où le taux de recyclage du calcin est élevé, le système se transforme encore plus en circuit fermé, car les proportions des divers composés s'accumulent, dans le verre constamment recyclé. Cette situation peut être un problème pour les métaux, les fluorures et les chlorures, comme pour le soufre.

Lorsque le volume des matières recueillies constitue un problème pour le recyclage, des techniques existent pour réutiliser une partie de l'absorbant, afin de réduire le volume total. La composition hétérogène, des poussières récupérées, ne constitue pas généralement un problème grave. De tels problèmes peuvent être résolus par une analyse rigoureuse et, si nécessaire, le stockage et le mélange des matières avant recyclage.

Dans la production de laine de roche, la réduction des  $\text{SO}_x$  doit avoir lieu après l'incinérateur et avant le système de filtration. Dans certaines applications actuelles, le système de filtration est placé avant l'incinérateur, destiné à traiter un gaz propre. Dans ces cas, la mise en œuvre de la technique, dans des installations existantes implique de modifier l'incinérateur ou d'installer un second système filtrant. L'intérêt économique des diverses options dépendra de la configuration du circuit des déchets gazeux. Ces modifications vont augmenter le coût et sont illustrées par la portion supérieure de la fourchette de coûts, discutés plus haut. La viabilité économique du traitement par voie semi-sèche n'a pas été démontrée dans ce secteur.

Le recyclage des matières dans le four est plus difficile pour la laine de roche que pour d'autres secteurs. Car l'ajout de sulfates n'est pas nécessaire, dans ce procédé et le bain de fusion

absorbe peu de soufre. Une grande partie des polluants serait donc rejetée à nouveau. Cela signifie que les déchets récupérés doivent être éliminés, sous forme d'effluents solides ou, si possible, valorisés. Le choix de l'absorbant, pour la laine de roche, est également limité, si le recyclage est envisagé. Le produit ne nécessite qu'un faible taux de soude, alors le carbonate et le bicarbonate de sodium ne peuvent être utilisés que si les matières récupérées ne sont pas recyclées.

Une technique alternative, testée aux Pays-Bas, consistait à absorber les Sox, pour produire de l'acide sulfurique, qui pouvait être vendu comme sous-produit. La production efficace d'acide sulfurique nécessite l'apport d'une forte concentration de SO<sub>2</sub>, dans le système catalyseur de l'installation de celui-ci. Cette opération a été possible dans ce cas car six cubilots fonctionnaient sur le site. Cinq étaient équipés d'un système d'épuration par voie sèche et toutes les matières étaient récupérées et recyclées dans le sixième, qui était équipé de l'installation d'acide sulfurique. Cette technique a été abandonnée, après cinq ans, en raison de difficultés persistantes d'exploitation, responsables de coûts tout à fait excessifs, plus élevés que les frais d'élimination. Il s'agissait d'un principe innovant qui malheureusement s'est avéré impraticable dans ce cas, et ne peut donc être considéré comme une technique disponible et reconnue dans cette application. Néanmoins, les difficultés techniques pourraient probablement être surmontées pour de futures applications, étant entendu que la viabilité économique de la technique devra être étudiée en détail.

Dans la production de laine de roche, une solution de remplacement, à l'épuration par voie sèche ou semi-sèche, pourrait être la mise en place d'un épurateur à venturi. De bons résultats pour l'élimination des SOx, 90 à 95 %, peuvent être obtenus. Mais la technique est moins efficace qu'un filtre à manches, pour la réduction des poussières. De plus, il y a production d'effluents liquides et les matières sont difficiles à recycler. Un petit nombre d'installations utilisent cette technique, avec succès, depuis plus de 20 ans. Bien qu'on admette généralement que ces épurateurs ne représentent pas la première option choisie aujourd'hui, là où ils sont installés ils constituent probablement la MTD.

#### Avantages :

- Des réductions substantielles des émissions de SOx peuvent être réalisées, en fonction du bilan spécifique de soufre et du recyclage.
- Réduction des rejets d'autres substances, chlorures, fluorures, composés de sélénium, autres acides comme l'acide borique.
- Dans la plupart des cas, les poussières récupérées peuvent être recyclées, ce qui permet de réduire la consommation de nouvelles matières premières.

#### Inconvénients :

- La technique consomme de l'énergie.
- La technique entraîne la production de résidus solides qui, s'ils ne peuvent être recyclés, augmentent la quantité d'effluents. Dans la plupart des cas, ils peuvent être recyclés, mais cela nécessite une adaptation des procédés et risque de limiter l'efficacité globale de la réduction des SOx.
- La technique représente des coûts élevés d'investissement et d'exploitation.

**Tableau 4.25 : Principaux avantages et inconvénients de l'épuration par voie sèche ou semi-sèche**

#### **Exemples d'installations**

Il existe de nombreux exemples de ces techniques, notamment le traitement par voie sèche, associé à un précipitateur électrostatique, ou un filtre à manches. La plupart des fours en Allemagne, où des mesures secondaires de réduction des poussières sont mises en place, utilisent ces techniques.

### 4.4.4 Fluorures, HF et chlorures HCl

Dans ce paragraphe, tous les fluorures sont exprimés en fluorure d'hydrogène, HF et les chlorures gazeux en acide chlorhydrique, HCl. La grande majorité des halogénures rejetés se trouvent sous ces formes. Les émissions de HF et de HCl proviennent d'impuretés dans les matières premières ou de matières premières qui sont sélectionnées, parce qu'elles contiennent ces espèces, en quantités suffisantes pour donner les qualités désirées aux produits.

#### 4.4.4.1 Réduction à la source

Dans la plupart des procédés, les émissions de HF et de HCl proviennent d'impuretés dans les matières premières, qui sont dégagées au cours de la fusion. De nombreuses matières premières contiennent très peu de fluorure et de chlorure et ont peu d'effets sur les niveaux d'émission finale. Toutefois, certaines matières premières contiennent des taux importants de ces éléments sous forme d'impuretés, dont les principales substances sont :

- carbonate de soude de synthèse, ayant une teneur résiduelle en NaCl d'environ 0,05 à 0,15 %
- dolomite qui peut contenir de grandes quantités d'impuretés de fluorure
- débris de verre de récupération qui peuvent contenir une série d'impuretés parfois en grandes quantités, comme les chlorures, les fluorures et les métaux. La quantité de ces substances varie, selon la pureté du calcin fourni, mais dans les régions où les taux de recyclage sont élevés, les espèces peuvent progressivement s'accumuler dans le verre
- poussières recyclées, provenant des équipements de réduction et contenant des sels de fluorure et de chlorure, qui peuvent s'accumuler dans le système
- certains combustibles, par exemple le coke issu de certaines sources, peuvent contenir des chlorures.

Les émissions de chlorures, rejetées par les opérations utilisant de fortes proportions de carbonate de sodium dans la composition, surtout du verre sodocalcique, sont nettement plus élevées que celles, par exemple, de la laine de verre ou du fil de silionne, voir Chapitre 3. Parmi les opérations pour lesquelles ces matières n'ont pas été ajoutées intentionnellement dans la composition, les émissions de HCl et de HF les plus élevées tendent à émaner des procédés de verre plat et de verre d'emballage.

Les niveaux d'émission peuvent être minimisés par la sélection rigoureuse des matières premières. Les questions liées aux taux de NaCl, dans le carbonate de sodium, sont examinées au paragraphe 4.4.1.1. Un certain nombre d'autres techniques, étudiées dans le Chapitre 4, ont elles aussi des effets positifs sur les émissions de HF et de HCl. Il s'agit principalement des techniques qui réduisent la volatilisation, en abaissant les températures, en réduisant le débit d'air et en minimisant la turbulence. Ces techniques sont :

- Plus grande utilisation de calcin. Ce qui permet de réduire la température et la consommation d'énergie et de remplacer le carbonate de sodium, avec ses impuretés de chlorure. Elle peut avoir un effet paradoxal, si le calcin contient de fortes teneurs en HCl ou HF.
- Boosting électrique.
- Meilleures conceptions et géométrie des fours.
- Position des brûleurs.



- Rapport air-combustible réduit.
- Brûleurs anti-NOx.
- Fusion à l'oxygène.
- Fusion électrique.

Un certain nombre de produits, de l'industrie verrière, utilisent du fluorure, contenant des matières permettant de transmettre des qualités particulières aux matériaux. Les exemples les plus importants sont présentés ci-dessous.

### **Fil de silionne**

La production de fil de silionne nécessite en général du fluorure. On ajoute du fluorure pour optimiser la tension de surface et les propriétés de liquidité, favoriser le fibrage et minimiser le risque de rupture des filaments. Ce sont des facteurs importants, pour la rentabilité économique du procédé et la performance environnementale. Les taux élevés de casse entraînent une baisse de productivité et une augmentation des déchets. La principale source de fluorure ajoutée est souvent du spath fluor,  $\text{CaF}_2$ , et on peut en trouver des proportions élevées dans le kaolin, silicate d'alumine.

De nombreux travaux ont été entrepris, pour développer des formules sans fluorure ajouté, qui se sont avérés efficaces dans certains cas. Plusieurs entreprises ont mis au point une méthodologie permettant d'utiliser une formule de composition sans fluorure, pour un grand nombre de leurs fours. Une autre société a mis au point une méthode similaire d'utilisation d'une composition sans fluorure, ni bore ajouté, et a obtenu des niveaux d'émission de poussières inférieurs à  $50 \text{ mg/Nm}^3$  et des émissions de HF de l'ordre de 10 à  $50 \text{ mg/Nm}^3$ . L'optimisation de ces techniques passe parfois par une modification de la configuration du four, dont la mise en œuvre sera plus efficace au moment d'une réfection.

La mise au point de verre, à faible teneur en fluorure et en bore, est le résultat de travaux coûteux de recherche et la technologie est jalousement gardée par les sociétés qui les ont développés. Elle n'est donc pas disponible immédiatement, pour tous les industriels. Les procédures d'enregistrement sont longues et chères, pour les nouveaux produits dont la formule a été modifiée.

### **Fabrication de frites**

Les émissions de fluorures sont directement liées à l'utilisation de composés de fluorure, dans la charge. Ils sont principalement utilisés dans la production d'émail, mais ne sont présents qu'en très faible quantité, dans les matières premières utilisées pour la fabrication de frites céramiques. Certains fabricants de frites céramiques produisent périodiquement de petites quantités d'émail, qui provoquent des émissions de fluorures. Mais cela ne concerne qu'un petit pourcentage de la production globale de l'entreprise. L'émission de fluorures est probablement l'incidence la plus importante, pour l'environnement de la production d'émail.

Les fluorures confèrent des propriétés uniques à la fritte, notamment une meilleure résistance thermique et chimique et une diminution du risque de cloquage du revêtement émaillé. Ils sont ajoutés à la composition sous forme de spath fluor, de fluosilicate, de cryolite ou de fluosilicate de sodium. La plupart des industriels proposent aujourd'hui certains émaux, avec peu ou pas de fluorure, et on trouve de plus en plus ces produits sur le marché. Au moment de la rédaction de ce document, les produits sans fluorure, représentent moins de 10 % de la production, et les produits à faible teneur en fluorure environ 30 %. En général, le fluorure de la composition ne peut pas être suffisamment réduit, pour donner des niveaux d'émission comparables à ceux des techniques d'épuration ou d'autres types de frites.

### **Verres opaques**

Les verres opaques sont fabriqués par les secteurs de la gobeletterie, des verres spéciaux et parfois du verre d'emballage. L'ajout de fluorure provoque une plombisation, dans le verre, qui lui donne cet aspect trouble et opaque caractéristique. La plupart des installations qui fabriquent ces produits utilisent des techniques d'épuration par voie sèche, pour traiter les émissions de HF. Aucune solution alternative concrète n'existe, pour produire une qualité comparable. Le verre opaque est souvent fabriqué dans des fours électriques à voûte froide. Ils permettent de réduire les émissions, car un fort pourcentage des fluorures est absorbé dans la couverture de composition et la quantité globale de fluorure nécessaire est moindre. En outre, la fusion électrique réduit beaucoup le volume de déchets gazeux à traiter.

Le secteur des verres spéciaux fabrique également du verre en plateaux, un produit optique contenant une très forte teneur en fluorure. Le taux de production de ce verre est très faible et s'accompagne toujours d'un traitement des effluents gazeux, dans les pays de l'Union européenne.

En général, les mesures de réductions à la source sont préférables à un traitement des effluents gazeux. Avec les verres contenant du fluorure, les mesures de réduction imposent parfois des conditions d'exploitation particulièrement strictes et nécessitent des travaux de recherche assez importants. Lorsque des réductions d'émission sont imposées par la législation, de nombreux producteurs privilégient le traitement des déchets gazeux et notamment l'épuration par voie sèche.

#### 4.4.4.2 Techniques d'épuration

Les principales techniques applicables à ces émissions sont l'épuration par voie sèche et l'épuration par voie semi-sèche. Ces techniques et les taux d'émission qui peuvent être obtenus sont présentés au paragraphe 4.4.3.3 ci-dessus. Le choix de l'absorbant est important et il constitue parfois un compromis entre la réduction de SO<sub>2</sub> et la réduction de HF et de HCl. En effet, on observe une réaction concurrente entre le HCl/HF et le SO<sub>2</sub> avec le carbonate de sodium. L'option optimale dépend d'un certain nombre de paramètres, y compris les proportions relatives des différents polluants, contenus dans les déchets gazeux.

L'épuration par voie humide est une autre technique, qui pourrait être viable techniquement et économiquement pour les très petites structures, certains fours de frittage par exemple utilisant une tour de lavage à garnissage, dans laquelle circule de l'eau ou, pour plus d'efficacité, une solution alcaline. Le principal inconvénient de cette méthode est la production d'effluents aqueux.

#### 4.4.5 Oxydes de carbone

Les oxydes de carbone incluent le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, et le monoxyde de carbone, CO. Ce dernier est le résultat d'une combustion incomplète et il est rarement rejeté par les installations de verrerie, dans des proportions qui pourraient susciter des craintes pour l'environnement. Ce sont dans les cubilots de laine de roche qu'on rencontre les taux les plus importants. Mais la plupart des installations sont équipées de dispositifs post-combustion, pour oxyder les émissions avant leur rejet. Le dioxyde de carbone est le résultat de la combustion des combustibles fossiles et d'autres matières organiques, ainsi que de la décomposition des matières carbonatées.

Les carbonates, carbonate de sodium et de calcaire, sont les principales sources d'oxydes de métaux alcalins et de métaux alcalino-terreux, dans la fabrication du verre. Les seules véritables sources alternatives de ces oxydes sont les déchets de récupération et de fabrication. Il s'agit du calcin pour la production de verre et des déchets de fabrication, des matières recyclées et du laitier, laine de roche uniquement, pour la laine minérale. Les questions, liées à ces matières, sont développées dans d'autres sections de ce document mais, d'une manière générale, le

principal facteur, limitant leur utilisation est leur disponibilité en quantité et en qualité suffisantes, ainsi que la régularité de l'approvisionnement. Une forte utilisation de ces matières est généralement limitée au verre d'emballage et à la laine de roche.

L'impact du dioxyde de carbone sur l'environnement est bien connu, mais il ne figure pas parmi les substances les plus polluantes, mentionnées à l'annexe III de la Directive 96/61/CE. L'emploi de plus en plus fréquent de matières recyclées, dans l'industrie du verre, est dicté par la nécessité d'économiser l'énergie et de réduire les déchets. L'effet sur le remplacement des matières carbonées, est un avantage supplémentaire. De même, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, liée à la diminution de la consommation de combustible, est dictée par la nécessité de limiter la consommation d'énergie et les coûts d'exploitation, ainsi que par les pressions exercées pour réduire les émissions de NOx.

De nombreuses techniques, étudiées dans ce chapitre, ont d'importantes implications pour les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aucune, hormis celles envisagées pour l'énergie et d'autres polluants, n'est présentée pour déterminer la MTD, pour les installations de verrerie.

## 4.5 Techniques de lutte contre les émissions atmosphériques rejetées par les activités autres que la fusion

Ce paragraphe traite des activités qui ne sont pas liées à la fusion ou à la manutention des matières. Ces activités concernent le formage, ainsi que toutes les opérations réalisées sur les produits, et qui sont généralement des composantes du procédé principal. Dans la plupart des activités de verrerie, la fusion des matières premières est la première opération réalisée, et c'est pourquoi les activités suivantes sont parfois appelées activités en "aval" dans ce document.

En raison de la nature très particulière de ces activités en aval, l'étude est présentée par secteur.

### 4.5.1 Verre d'emballage

La principale source d'émission atmosphérique, dans la production du verre d'emballage, est le traitement de surface à chaud. Le revêtement, une couche mince d'oxyde métallique, est appliqué en faisant passer les conteneurs chauds de la machine de formage, dans une hotte contenant des vapeurs de composés d'étain et de titane. Les matériaux les plus souvent utilisés sont le tétrachlorure d'étain anhydre, SnCl<sub>4</sub>, le tétrachlorure de titane anhydre, TiCl<sub>4</sub>, et le chlorure d'étain monobutyle, C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>SnCl<sub>3</sub>. Les rejets sont constitués de HCl, d'oxychlorures, d'oxydes d'étain et de titane, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, sous forme de fines particules et des matières de revêtement qui n'ont pas été converties. Des émissions peu importantes de COV peuvent également provenir du traitement de surface. Ces émissions ne sont pas jugées importantes et ne sont pas étudiées dans ce document.

La première étape consiste à minimiser l'emploi du revêtement, en fonction des besoins du produit. L'utilisation du matériau peut être encore optimisée, en assurant une bonne étanchéité des zones d'application, afin de réduire les pertes.

Il existe actuellement quatre grandes options pour traiter les effluents gazeux :

- (a) Extraire et rejeter directement à l'atmosphère, à l'aide d'une bonne dispersion.
- (b) Extraire et traiter, par des techniques secondaires comme l'épuration par voie humide.
- (c) Regrouper les effluents gazeux avec ceux du four.
- (d) Regrouper les effluents gazeux avec l'air de combustion du four.

L'option (a) ne fait rien pour réduire les émissions et ne sera donc pas étudiée plus avant. Toutefois, lorsque les émissions sont vraiment très faibles, cette méthode peut être envisagée

dans certains cas particuliers. L'option (d) risque de limiter certaines mesures primaires, de réduction des NOx et des poussières et, même s'ils ne sont pas considérables, les effets sur les propriétés chimiques du verre méritent d'être envisagés. Il n'existe pas d'exemples connus de cette méthode, mais elle peut être adaptée à certaines circonstances.

L'option (c) peut être satisfaisante, dans le cas d'une réduction secondaire des effluents gazeux du four. Lorsque les matières récupérées sont recyclées, il faut tenir compte de l'action des métaux sur le verre et de l'accumulation de chlorure dans le circuit. Ces facteurs peuvent limiter le recyclage des poussières dans certains cas. S'il n'y a pas de réduction secondaire, cette méthode n'est qu'une dilution des émissions.

Comme mentionné dans d'autres paragraphes de ce document, les tours de lavage à garnissage peuvent être efficaces, pour réduire les rejets gazeux, mais leur efficacité pour traiter les poussières fines est limitée par la chute de pression dans le circuit. La performance dépendra de la composition à l'admission, mais une tour de lavage à un étage peut suffire, pour assurer la conformité avec les normes locales. Si une réduction plus poussée est souhaitée, on peut mettre en place un filtre à manches, suivi d'une tour de lavage à garnissage ou un épurateur à venturi, suivi d'une tour de lavage à garnissage. Ces techniques devraient permettre de réduire les taux de HCl à moins de 10 mg/Nm<sup>3</sup>, les particules de 5 à 10 mg/Nm<sup>3</sup> et les métaux totaux de 1 à 5 mg/Nm<sup>3</sup>. Si le HCl est présent sous forme d'aérosols, on peut espérer des émissions de moins de 30 mg/Nm<sup>3</sup>. Le coût de ces solutions alternatives dépend du volume des déchets gazeux. Dans des situations localisées, des chiffres comparables peuvent être obtenus avec des méthodes moins sophistiquées. Si une réduction plus poussée est souhaitée, il est possible de mettre en place un filtre à manches, suivi d'une tour de lavage à garnissage, ou un épurateur à venturi, suivi d'une tour.

### 4.5.2 Verre plat

D'une manière générale, les émissions atmosphériques, issues d'activités autres que la fusion, dans la production de verre plat, sont très faibles et ne nécessitent pas de mesures de réduction. Si le bain de float est bien utilisé, il n'y a pas d'émission importantes de vapeurs d'étain. Le SO<sub>2</sub> est utilisé à l'entrée de l'arche de cuisson mais, là aussi, si le traitement est correctement effectué, les émissions sont négligeables. Les seules émissions potentielles proviennent de la combustion des réchauffeurs au gaz naturel, dans la galerie, sauf lorsque le traitement de surface est effectué en continu. Les émissions sont spécifiques à chaque cas, et un exemple concret est donné ici, pour décrire les techniques qui peuvent être utilisées.

Les matières premières, pour ce traitement de surface sont le tétrachlorure d'étain, SnCl<sub>4</sub>, l'acide fluorhydrique, HF, le méthanol, CH<sub>3</sub>OH, et un silane, SiH<sub>4</sub>. L'opération est réalisée en deux phases distinctes, une sous-couche de SiCO et une couche de finition d'oxyde d'étain, dopé au fluorure. Les émissions, issues de la phase d'application de la sous-couche, traversent un incinérateur thermique pour détruire d'éventuels éléments organiques, les effluents gazeux sont refroidis et les matières solides, silice amorphe, sont éliminées par un filtre à manches. Les matières récupérées sont recyclées dans le four.

Dans la phase d'application de la couche de finition, les effluents gazeux, qui contiennent des halogénures et des composés stanniques, sont envoyés dans un réacteur haute température, pour oxyder les composés stanniques. L'oxyde d'étain solide est éliminé par un précipitateur électrostatique et les halogénures sont éliminés dans une tour de lavage chimique à garnissage.

Les niveaux d'émission obtenus sont :

Particules	15 mg/Nm <sup>3</sup>
Chlorure d'hydrogène	5 mg/Nm <sup>3</sup>
Fluorure et ses composés gazeux (HF)	<1 mg/Nm <sup>3</sup>

Métaux

<5 mg/Nm<sup>3</sup>

En général, les rejets produits par ces activités peuvent être contrôlés par une combinaison des techniques mentionnées ci-dessus. Dans certains cas, d'autres techniques d'efficacité équivalente peuvent être appropriées.

- Equipement de réduction des poussières : filtre à manches ou PE, mais le premier donnera probablement des chiffres inférieurs, de 1 à 5 mg/Nm<sup>3</sup>.
- Les techniques, décrites ci-dessus, peuvent être associées à une épuration par voie sèche.
- Epuration chimique par voie humide.
- Oxydation à haute température, incinération thermique ou équivalent.

Les coûts sont spécifiques à chaque site, mais ne sont pas en général jugés disproportionnés par rapport aux résultats obtenus.

### 4.5.3 Fil de silionne

Dans ce secteur, les émissions atmosphériques, non liées aux activités de fusion, proviennent de quatre sources :

- Application du revêtement des fibres.
- Séchage du gâteau.
- Découpe et granitage.
- Traitement secondaire.

Les émissions atmosphériques, issues de l'application d'un revêtement, sont habituellement peu importantes, en raison de la faible volatilité des matériaux de revêtement et de la basse température du verre, au point d'application. Un aspect important est la sélection des matières de revêtement, contenant de faibles pourcentages de solvants organiques. Certaines espèces volatiles seront cependant présentes sous forme de solvants ou de sous-produits des réactions. Les matériaux de revêtement sont très différents, selon les produits et les installations. Une sélection rigoureuse est la méthode la plus efficace, pour réduire les émissions. Les gros volumes d'air, nécessaire pour refroidir le verre, rendent très difficile et onéreux le contrôle des émissions de COV, par des mesures secondaires.

Le débit d'air élevé se traduit par l'entraînement de gouttelettes et favorise la volatilisation des COV éventuellement présents. Les systèmes d'épuration, par voie humide, sont souvent utilisés pour contrôler les effluents gazeux. Mais les effets sur les substances volatiles seront limités à la condensation. On peut également utiliser des précipitateurs électrostatiques humides, dans cette application, mais on n'en connaît aucun exemple. Les coûts d'une épuration ou de précipitateurs électrostatiques, par voie humide, sont similaires à ceux mentionnés pour le secteur de la laine minérale. Les niveaux d'émission dépendent entièrement des niveaux de départ pour chaque cas particulier, quelques chiffres maximums sont mentionnés dans le Chapitre 3.

Les gâteaux humides sont séchés, dans des fours, et toutes les espèces volatiles à ces températures seront rejetées avec la vapeur d'eau. En général, le poids moléculaire de ces matières est relativement élevé, et un gros pourcentage de substances volatiles a déjà été rejeté, au cours de l'application du revêtement. On possède peu d'information sur les niveaux d'émission, voir Chapitre 3, et la seule technique utilisée actuellement, pour minimiser les émissions, est la sélection des matières. Les volumes d'effluents gazeux sont relativement faibles et des techniques de contrôle standard peuvent être utilisées, en cas de rejets importants, par exemple incinération, adsorption et épuration. Il n'existe aucune donnée économique pour ces techniques, dans cette application, mais ces procédés sont courants pour de petits volumes.

Il sera cependant toujours préférable de prévenir ces émissions, en optimisant la formule de revêtement, avant de mettre en œuvre toute autre technique de réduction.

Les émissions de poussières, issues des opérations de découpe et de granitage, sont facilement traitées par extraction vers un système de filtration. Il s'agit de la méthode standard, utilisée dans tout le secteur, et les émissions sont comprises entre 1 et 5 mg/Nm<sup>3</sup>.

Un traitement secondaire peut nécessiter l'emploi d'un complément de matières de revêtement ou de liants. Les émissions sont spécifiques à chaque cas et les techniques standard de réduction des COV et des traces gazeuses peuvent être mises en œuvre, si les mesures primaires n'ont pas permis d'obtenir les niveaux de performance recherchés.

### 4.5.4 Gobeletterie

Dans la plupart des procédés de gobeletterie, les activités en aval du four ne génèrent pas d'émissions atmosphériques significatives. On utilise différents types de brûleurs, pour maintenir la bonne température du verre, pour le polissage au feu, et dans l'arche de recuisson. Mais il n'y a pas de rejets importants, nécessitant des mesures particulières de réduction des polluants. L'exception à cette règle est la production de pièces qui doivent être découpées et polies, notamment le cristal au plomb 30%, le cristal au plomb 24% et le cristal.

La découpe consiste à graver, à la main ou à la machine, des dessins précis, sur les articles de verre nu, à l'aide d'une meule à diamant. On peut également effectuer des opérations de découpe et de doucissage, comme le doucissage des arêtes. L'eau est utilisée comme liquide de refroidissement et pour empêcher le dégagement de poussières. Un système d'extraction peut aussi être prévu, pour éliminer d'éventuelles buées, dégagées par le liquide de refroidissement. Lorsque ces opérations sont réalisées dans un produit de refroidissement liquide, les rejets dans l'atmosphère ne sont pas quantifiables, mais il peut être nécessaire d'installer un dévésiculeur, sur le dispositif d'extraction. Pour les opérations de découpe et de doucissage à sec, la poussière peut être aspirée et dirigée vers un filtre à manches, haute efficacité, afin d'obtenir une émission de poussière de l'ordre de 1 à 5 mg/Nm<sup>3</sup>.

La découpe donne une surface grise non finie sur le verre. L'aspect original de la surface est restitué, par immersion dans un bain de polissage, contenant de l'acide fluorhydrique et de l'acide sulfurique. La surface du bain de polissage dégage des vapeurs de HF et de SiF<sub>4</sub>. Le moyen le plus efficace de traiter ces émissions est en général le lavage par voie humide, avec de l'eau ou une solution chimique. Au cours de cette opération, de l'acide hexafluorosilicique, H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, se forme, jusqu'à 35 %, et la liqueur acide doit être neutralisée. On peut également récupérer le H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> et, si cela est possible, l'utiliser comme produit de départ dans l'industrie chimique.

Pour ces applications, les laveurs permettent d'obtenir des niveaux d'émission très bas, < 5 mg/Nm<sup>3</sup> de HF. Etant donné la nature très acide des rejets, la solubilité dans l'eau est élevée et un lavage chimique ne devrait pas être nécessaire. Le lavage chimique permet de diminuer la consommation d'eau, mais pas de récupérer le H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> des effluents. D'autres techniques sont étudiées pour remplacer le polissage à l'acide, mécanique et à haute température, par flammes ou laser. Mais à l'heure actuelle, elles ne sont pas considérées comme disponibles.

### 4.5.5 Verres spéciaux

En général, l'émission atmosphérique, due à des activités classiques, situées en aval, n'est pas considérable. La production de verre pour TV fait appel à des opérations de doucissage et de polissage, mais celles-ci sont réalisées dans un milieu liquide et ne devraient engendrer aucune émission aérienne. Lorsqu'un verre pour TV, ou tout autre produit, subit une opération de



découpe, de doucissage ou de polissage à sec, les rejets sont aspirés par un filtre à manches qui permet de maintenir des valeurs d'émission de l'ordre de 1 à 5 mg/Nm<sup>3</sup>. Ce secteur est très diversifié et, pour certaines activités, il convient de prendre en compte les paramètres spécifiques à une installation donnée.

#### 4.5.6 Laine minérale

Dans le secteur de la laine minérale, quatre activités, hormis la fusion, sont sources d'émission polluantes, le formage, la cuisson, le refroidissement du produit, ainsi que l'usinage et le conditionnement. Le Chapitre 3 montre que les émissions, causées par le formage et la cuisson, sont les plus importantes. Ces émissions sont largement liées à l'emploi de liant phénolique.

Dans ce paragraphe, les techniques ont été décrites séparément, pour la zone de formage et la zone de cuisson, dans un esprit pratique, mais aussi parce que la nature des gaz résiduels est différente. Plusieurs techniques sont toutefois applicables, dans les deux cas et, en particulier pour la production de laine de verre, une réduction des polluants combinée peut être intéressante. Lorsque c'est le cas, les techniques sont décrites de manière plus approfondie, dans le paragraphe concernant la zone de formage, avec des renvois au paragraphe relatif à la cuisson.

Plusieurs différences de taille existent entre les émissions générées par les chaînes de fabrication de la laine de verre et de la laine de roche. Elles sont examinées dans les paragraphes relatifs aux techniques auxquelles elles s'appliquent le mieux.

##### 4.5.6.1 Zone de formage

Dans la zone de formage, la fonte de verre ou de roche est fibrée, puis on ajoute le liant. La fibre enrobée de résine est envoyée sur un tapis de ramassage, sous aspiration. Pour la laine de verre, on vaporise de l'eau dans le conduit de tirage et dans le ventilateur. Cette opération a deux fonctions, empêcher l'accumulation de matière dans le conduit, et éliminer du courant gazeux certains éléments particuliers et gazeux. Pour la laine de roche, la différence de technique concerne la pulvérisation d'eau, dans les conduits. Certaines méthodes sont comparables aux installations de laine de verre, mais de nombreuses usines n'utilisent pas du tout la pulvérisation d'eau. Les campagnes de fusion, de la laine de roche en cubilot, ne durent que quelques semaines, et il est donc possible de nettoyer le conduit. La pulvérisation d'eau n'est donc pas toujours jugée nécessaire.

Le déchet gazeux, de la zone de formage, contient probablement des taux importants de particules, de phénol, de formaldéhyde et d'ammoniac. Les particules sont constituées de matières organiques et inorganiques, souvent collantes et de très petite dimension. On peut également détecter des taux moindres de COV et d'amines, s'ils font partie des composants du liant. A cause de la nature du procédé, le courant gazeux est légèrement au-dessus de la température ambiante, a un volume important et, si des pulvérisateurs d'eau sont utilisés, il est saturé d'eau. Ces propriétés, conjuguées à la nature des polluants, limitent le nombre de techniques de réduction des polluants qu'il est possible de mettre en œuvre.

Les rejets peuvent être sensiblement aggravés, par un certain nombre de facteurs, en particulier :

- les propriétés chimiques du liant.
- la technique de fibrage.
- les conditions d'exploitation, la température, le débit de l'air et l'humidité.
- la quantité de liant appliqué.
- la méthode d'application du liant.

L'optimisation de ces paramètres, parallèlement à la pulvérisation d'eau, peut sensiblement réduire les émissions générées par la fabrication. La composition chimique du liant est un des facteurs les plus importants, avec des implications majeures pour le circuit d'eau de procédé et les émissions liées au formage, à la cuisson et au refroidissement. Les complexes liants varient selon les industriels et souvent seuls les professionnels du secteur en ont une bonne connaissance. Un liant peut être strictement spécifique à une installation et il conviendrait parfois d'étudier chaque cas individuellement. Le paragraphe ci-dessous en résume certains aspects.

### **Composition chimique des résines et des liants**

L'optimisation des propriétés chimiques du complexe liant et l'efficacité de la méthode d'application, peuvent avoir une incidence notable, sur les rejets dans l'environnement. Le liant représente également un pourcentage élevé, du coût du produit fini. Les ingénieurs procédé considèrent donc que la mise au point, des liants et des techniques d'application, est strictement confidentielle.

Le liant est constitué d'eau, de résine phénolique, d'urée, de sulfate d'ammonium, d'ammoniac, de silane, d'huile minérale, d'huile de silicone et éventuellement d'autres ingrédients spécifiques à chaque procédé. La résine est essentiellement un résol, composé d'un mélange de phénol triméthylol, de phénol diméthylol, de formaldéhyde, de produits issus d'une faible réaction avec le phénol et le formaldéhyde, ainsi que de traces de phénol. La résine est un produit à base d'eau, contenant généralement 50 % de matières solides. Un excès de formaldéhyde est utilisé dans la réaction, pour obtenir une faible teneur en phénol libre.

Certaines résines sont catalysées par l'amine et peuvent produire des quantités non négligeables d'amine gazeuse, dans le gaz résiduaire. Ces rejets peuvent être virtuellement éliminés, par l'emploi d'autres espèces chimiques de catalyse, dans la production de la résine. Différentes substances peuvent être utilisées, mais la composition précise des complexes optimisés est généralement considérée comme un secret de fabrication. En utilisant des résines non catalysées par l'amine, on peut obtenir des niveaux d'émission inférieurs à 5 mg/Nm<sup>3</sup>. Lorsqu'une entreprise ne possède pas le savoir-faire interne suffisant, pour mettre au point une résine, non catalysée par l'amine, elle peut facilement se procurer ces complexes liants auprès de fournisseurs spécialisés.

L'urée est mise en réaction, avec la résine, pour étendre celle-ci, et réduire les teneurs en formaldéhyde libre. Elle permet également d'améliorer la résistance au feu du produit fini. L'urée réagit avec le formaldéhyde libre de la résine, pour former des méthylolurées, qui à leur tour réagissent avec les sites actifs de la résine phénolique et interviennent, dans le mécanisme de réticulation au cours de la cuisson. L'urée agit comme un substitut du phénol et permet d'obtenir un liant moins coûteux. L'industriel est donc tenté de maximiser la quantité d'urée dans la résine, au point d'affecter la qualité du produit et les paramètres de traitement.

L'urée a deux inconvénients majeurs. Elle réduit la solubilité de la résine et elle peut se décomposer, dans la zone de formage et dans le four pour traitement thermique, pour former de l'ammoniac. D'un point de vue écologique, la maximisation de l'emploi d'urée est un atout, car elle permet de limiter les rejets de formaldéhyde et remplace le phénol. Il est préférable d'avoir à traiter les produits de décomposition de l'urée, plutôt que les rejets, générés par les dérivés phénoliques, et les produits de combustion partielle.

L'ammoniac joue plusieurs rôles importants, dans le complexe liant, et donne une certaine souplesse d'emploi, ce qui est important pour optimiser l'ensemble du procédé. L'ammoniac améliore la solubilité du liant, ce qui permet d'ajouter une plus grande quantité d'urée et de conserver le liant plus longtemps. Il contribue également à maintenir le pH du complexe, dans une fourchette acceptable, et réagit avec le formaldéhyde libre. La nature du procédé est telle

que des rejets d'ammoniac, supérieurs à la normale, peuvent se produire pendant de courtes périodes. La diminution des proportions d'ammoniac, dans le procédé, peut avoir des effets disproportionnés, par rapport aux effets sur le reste du procédé. Un niveau plus élevé de rejet d'ammoniac peut se traduire par une baisse des émissions globales.

On ajoute du sulfate d'ammonium, pour contrôler la cuisson de la résine. Le silane est une liaison essentielle, entre le verre inorganique et le liant organique. Les groupes hydroxyle du silane interagissent avec les oxydes du verre, et le groupe fonctionnel organique réagit avec la résine, pour former une liaison forte. Des huiles minérales et de silicone sont ajoutées pour améliorer les caractéristiques de manutention du produit, supprimer la formation de poussières et conférer un certain degré d'hydrophobie.

Lorsque le liant est appliqué au verre chaud, dans la zone de formage, les éléments volatiles, ammoniac, formaldéhyde et phénol, sont vaporisés et évacués vers le point d'échappement. Le taux de rejets volatiles sera fonction de la quantité de matière volatile, qui n'a pas réagi dans le liant, de la dilution du liant, de la température dans la hotte de réception, et de la température du verre. Le liant est appliqué par pulvérisation fine, et les gouttelettes, qui ne sont pas retenues sur le matelas, seront rejetées dans l'air extrait. Le degré de rétention du liant, sur le produit, dépend de la répartition des gouttelettes, par grosseur, de l'épaisseur du matelas et de la force d'aspiration appliquée.

Plusieurs solutions de remplacement des liants phénoliques ont été étudiées, mais aucune n'a donné une qualité acceptable.

#### **4.5.6.1.1 Jets à impact et cyclones**

##### **Description de la technique**

La teneur en eau, des effluents gazeux, est un facteur important, pour déterminer les systèmes les plus appropriés de réduction des polluants, pour la zone de formage. Le caractère continu, de la production de laine de verre, implique l'emploi d'un dispositif de nettoyage, permettant d'empêcher l'accumulation de matières et de fibres organiques visqueuses, dans les conduits d'aspiration et le ventilateur. La technique normale consiste à pulvériser de l'eau, dans les conduits, de plusieurs manières. Le caractère discontinu de la production de laine de roche en cubilot, campagnes de 1 à 3 semaines, donne l'occasion de nettoyer les conduits si nécessaire. Par ailleurs, la production de laine de roche nécessite une quantité de liant un peu plus faible, par unité de volume de produit, et l'accumulation est donc plus lente. Pour la laine de roche, certains procédés utilisent des pulvérisateurs d'eau, dans la zone de formage. Mais l'emploi de cette méthode est surtout une question de préférence des industriels, ou de conditions spécifiques à une installation.

Lorsque des pulvérisateurs d'eau sont utilisés pour nettoyer les conduits, il est logique d'optimiser leur emploi pour nettoyer également le flux gazeux. Dans ce cas, les deux objectifs sont totalement complémentaires, plus on élimine de matières des effluents gazeux, plus l'opération de nettoyage est efficace. Les dispositifs ont souvent été adaptés au-delà du minimum nécessaire, pour prévenir une accumulation inacceptable, dans les gaines. Le terme jets à impact est utilisé dans l'industrie pour décrire cette technique optimisée.

Pour optimiser l'efficacité du nettoyage du gaz, les dispositifs pulvérisent l'eau, en gros volume et à haute pression. Cette opération n'entraîne pas une chute de pression importante. La conception des jets à impact varie selon les procédés. Elle vise à optimiser l'efficacité de la technique, tant pour le nettoyage des conduits que pour le lavage des gaz résiduels. Pour éliminer l'eau entraînée, par des effluents de gaz, les jets à impact sont toujours associés à des cyclones, ou d'autres dispositifs, qui ont également une incidence sur les taux de particules en fonction du modèle, comme décrit au Paragraphe 4.4.1.4.

L'élimination des particules et des gouttelettes se fait par impaction/captage et, dans une moindre mesure, par diffusion. Certains dispositifs impliquent le rétrécissement du conduit, pour améliorer l'efficacité de l'élimination des particules qui dépend principalement de la chute de pression, faible sur tous ces dispositifs.

Les substances gazeuses seront partiellement absorbées, par contact avec l'eau. Le taux d'absorption du gaz dépend de la différence entre la pression partielle dans le flux de gaz résiduel, et de la pression de vapeur dans le liquide, de la solubilité dans le liquide de la surface de contact et dans une moindre mesure de la durée de celui-ci. On observera également un effet de condensation, qui peut être important, si les effluents gazeux sont chauds.

Pour les jets à impact, on utilise de l'eau de procédé, qui contient déjà la plupart des substances, présentes dans le flux gazeux, en quantités diverses. L'efficacité de l'élimination des substances gazeuses en sera particulièrement modifiée. L'eau de procédé recyclée est filtrée, avant d'être réutilisée. Mais elle contient des taux non négligeables de matières solubles. Le système est un équilibre dynamique et le circuit d'eau de procédé est décrit plus loin dans ce document.

### **Performances environnementales**

La chute de pression étant faible, le taux d'élimination des particules fines et des gouttelettes est assez réduit. Dans la zone de formage, toutefois, les matières solides fibreuses et de gros diamètre sont nombreuses et sont facilement éliminées par les jets à impact et les cyclones. Les émissions en bout de chaîne dépendent, en grande partie, des propriétés chimiques du liant, et de l'eau de procédé, ainsi que de la quantité de liant appliqué. Les chiffres obtenus avec cette technique sont donnés dans le Tableau 4.29.

### **Aspect financier**

Les coûts liés à cette technique sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. Il est difficile d'évaluer les coûts de cette technique, utilisée comme mesure de réduction des polluants, car avec des jets à impact, une condition, inhérente au procédé, est la mise en place d'un dispositif quelconque de nettoyage. Les chiffres donnés dans le tableau représentent le coût total, pour le dispositif. Il n'existe pas d'exemple de dispositifs mis en place juste pour nettoyer les conduits. Ils sont toujours installés pour les deux fonctions. On estime que la partie nettoyage du gaz représente 60 % du coût total. Cette analyse est quelque peu théorique, car dans la plupart des Etats membres, les rejets sans traitement ne sont pas autorisés et d'autres coûts viennent s'ajouter, pour la lutte contre la pollution.

### **Applicabilité**

En principe, cette technique est applicable à tous les procédés, de production de laine de verre, et de laine de roche. Elle n'est pas utilisée dans de nombreuses usines de fabrication de laine de roche, car elle n'est pas jugée nécessaire, pour le nettoyage et pourrait avoir un effet néfaste sur d'autres techniques mises en œuvre pour diminuer les polluants. Pour les rejets des zones de formage, des jets à impact et des cyclones sont utilisés dans 90 % environ, des installations de laine de verre, et 10 % des usines de fabrication de laine de roche.

### **Autres aspects annexes**

A moins que ne soit utilisée une autre technique, comme le lavage sur lit à garnissage, les cyclones, ou quelquefois un autre dispositif, sont incorporés aux jets à impact, pour éliminer l'eau entraînée. Cette méthode est nécessaire pour réduire la consommation d'eau, et pour obtenir une bonne visibilité et une bonne dispersion du panache. Lorsque d'autres techniques hydrauliques sont utilisées, précipitateurs électrostatiques humides ou tours de lavage à garnissage, les jets à impact sont souvent installés en amont.

## Exemples d'installations

Cette technique est si largement utilisée qu'il est inutile de donner des exemples d'installations.

### 4.5.6.1.2 Dépoussiéreurs hydrauliques

#### Description de la technique

Les dépoussiéreurs sont utilisés pour contrôler tant les émissions gazeuses que les émissions de particules. La technologie de base, de ces deux opérations, est similaire, mais ce sont les critères de conception qui sont très différents. Pourtant, pour limiter les dépenses d'infrastructure, les dépoussiéreurs sont souvent utilisés pour lutter contre les émissions de particules et de gaz. Leur conception est forcément un compromis, mais elle peut constituer la MTD, dans la mesure où chaque dispositif, pris séparément, est hors de prix. Le dépoussiérage par voie humide est une technique parfaitement documentée, et seuls les principaux aspects et les problèmes spécifiques à ce secteur sont présentés ici.

Le captage des particules, par le dépoussiérage humide, est réalisé aux moyens de trois mécanismes, l'impaction par inertie, l'interception et la diffusion. L'élimination des traces gazeuses, par dépoussiérage hydraulique, se fait par absorption et dans une moindre mesure par condensation. L'absorption implique un transfert de matière, entre un gaz soluble et un solvant, dans un appareil de contact gaz-liquide.

L'efficacité du captage des particules par le laveur dépend en grande partie de l'énergie totale utilisée, notamment de la chute de pression, dans toute la zone de captage. Si le liquide est uniformément répandu, dans le dépoussiérateur, des chutes de pression similaires donneront souvent les mêmes performances, pour une même poussière, avec des modèles de dépoussiéreurs assez différents. Il n'est donc pas possible de concevoir un dépoussiérateur hydraulique très performant, pour les particules de 1  $\mu\text{m}$  et moins, lorsque la chute de pression n'est pas importante. Les dépoussiéreurs haute énergie peuvent être très performants, pour le captage des particules inférieures à 0.5  $\mu\text{m}$ . Mais les charges d'exploitation sont élevées et d'autres techniques pourraient être plus économiques.

Le taux d'absorption du gaz dépend de la différence entre la pression partielle du gaz soluble, dans le courant de gaz résiduel, et de la pression de vapeur du gaz, dans le liquide, de la solubilité du gaz, dans le liquide, de la surface de contact et, dans une moindre mesure, du temps de contact. On observera également un effet de condensation, qui peut être important si les effluents gazeux sont chauds. La solubilité, bien évidemment, dépend du gaz et du liquide. L'eau convient pour absorber les gaz acides solubles, comme le chlorure d'hydrogène, le fluorure d'hydrogène, l'hexafluorure de silicone et pour l'ammoniac. Les solutions alcalines ou acides conviennent pour absorber des gaz moins solubles et, dans certaines applications, les solutions oxydantes permettent d'éliminer les odeurs organiques. La surface est déterminée par la taille de la matière de garnissage ou des gouttelettes.

Les tours de lavage à garnissage sont constituées d'une enveloppe extérieure, contenant un lit de garnissage, sur des grilles de support, des distributeurs de liquide, des entrées et sorties de gaz et de liquide et un dévésiculateur. L'alimentation en liquide est continue, sur le garnissage, formant un film et conférant une grande surface de contact gaz/liquide. Le courant de gaz empoussiéré traverse le garnissage et la circulation du liquide et du gaz peut se faire à contre-courant, à courant parallèle, ou à courant transversal. Il existe plusieurs types de garnissage, dont la matière est disposée de manière régulière ou aléatoire. Le film liquide, au-dessus du garnissage, présente une large surface, pour le transfert de matière. Les absorbeurs à contre-courant optimisent la force d'entraînement, car le gaz quittant le garnissage, rencontre du liquide

absorbant propre. Les garnissages peuvent être obstrués par des particules insolubles, du calcaire ou des formations biologiques.

Dans certaines applications, on peut envisager l'utilisation de dépoussiéreurs à venturi. La caractéristique de ce système est le rétrécissement du conduit, col du venturi, provoquant l'augmentation de la vitesse du gaz. Le liquide est introduit dans le dépoussiéreur et forme un film sur les parois, qui est atomisé par le flux gazeux, dans le col du venturi. L'efficacité du dépoussiéreur à venturi dépend de la chute de pression, et c'est pourquoi la consommation d'énergie et les coûts d'exploitation sont élevés. Les dépoussiéreurs à venturi sont en général les dispositifs hydrauliques les plus performants, pour le dépoussiérage, car ils permettent d'arrêter des particules submicroniques. Ils peuvent aussi être utilisés pour éliminer les traces gazeuses, mais leur efficacité est limitée par une durée de contact trop faible.

Les dépoussiéreurs hydrauliques les plus répandus, dans l'industrie, sont les tours de lavage à garnissage, en général avec des jets à impact en amont. Les jets à impact permettent d'éliminer les plus grosses particules et contribuent ainsi à empêcher l'obstruction du garnissage. Certains industriels ont installé des laveurs hydrauliques ionisants, LHI, ce qui permet de conjuguer les avantages d'un dépoussiéreur par voie humide et d'un précipitateur électrostatique, dont les coûts d'exploitation sont bas. Le LHI est en fait une tour de lavage à garnissage maintenue en charge neutre et précédée d'une section ionisante pour charger les particules. Le lit est normalement constitué d'un garnissage plastique. La vitesse du gaz traversant le lit est faible pour que les particules passent le plus de temps possible à proximité des éléments de garnissage.

Lorsque les déchets gazeux de la zone de formage entrent en contact avec l'eau dans un dispositif de lavage performant, on observe les événements suivants :

- une portion des particules entraînées, surtout les grosses particules, et les gouttelettes sont maintenues en suspension.
- une portion des éventuelles matières résineuses solubles sont absorbées par l'eau.
- et les substances volatiles forment un équilibre, entre les phases gazeuse et aqueuse.

L'eau de procédé est la liqueur de lavage la plus souvent utilisée dans l'industrie. Elle présente le problème potentiel de maintenir des concentrations suffisamment basses de matières volatiles, dans le milieu de lavage, pour faciliter une bonne absorption et empêcher le retour vers la phase gazeuse. Le procédé de fabrication, de la laine minérale, est grand consommateur d'eau et la performance du dépoussiéreur peut être améliorée, en introduisant l'eau propre par le haut. Ce bénéfice peut être optimisé en utilisant un procédé de lavage combiné à plusieurs étages. L'eau s'écoulant d'un étage à l'autre, à contre-courant du flux gazeux. De cette manière, l'eau la plus sale est utilisée pour épurer le flux gazeux entrant, le plus sale, et l'eau propre est utilisée dans le stade final de lavage.

Une des solutions possibles au problème serait de séparer le milieu de lavage du circuit d'eau de procédé, puis d'utiliser l'eau propre avec une purge suffisamment élevée pour assurer une absorption efficace, ou d'ajouter à la liqueur de lavage une dose de substances chimiques, qui réagiront avec les espèces volatiles. Ces deux méthodes ont toutefois des limites de taille. Pour obtenir une performance nettement meilleure, avec un circuit d'eau propre, le volume de purge à recycler dans le circuit d'eau de procédé serait trop important et entraînerait de nouveaux effluents qu'il faudrait traiter séparément. Le volume d'eau, provenant des jets à impact, aggraverait ce problème.

La teneur en eau et la nature résineuse des déchets gazeux entraîneraient des problèmes d'obstruction et de volume de liqueur, dans un laveur chimique, à moins d'utiliser une purge de gros volume. En raison de leur teneur en substances chimiques, ces fluides ne pourraient pas être recyclés, vers le circuit d'eau de procédé, encore une fois créant de nouveaux effluents qu'il faudrait traiter séparément. Une autre complication est que les réactifs chimiques, nécessaires pour éliminer le phénol/formaldéhyde et l'ammoniac, sont incompatibles et qu'il faudrait prévoir



des phases séparées. Les étages de lavage chimique pourraient être disposés en série, avec un dépoussiéreur à eau de procédé. Mais cette solution est très coûteuse et, à moins d'être extrêmement performante, ne permettrait pas de résoudre le problème considéré. En outre, pour ce qui est des effluents aqueux, il n'y aurait probablement guère de différence d'émissions, entre une telle technique et le dépoussiéreur à eau de procédé, avec une bonne maîtrise de celui-ci.

Le dépoussiérage multi-étage, dans une unité mixte, ou des unités séparées, est en théorie une option possible, pour la zone de formage et pour les rejets cumulés, des zones de formage et de cuisson. Toutefois, comme aucune installation de fabrication de laine minérale n'est équipée de dépoussiéreurs multi-étage, il n'existe aucune information sur les performances antipollution, les coûts ou les éventuels problèmes d'exploitation. On ne peut donc pas dire que la technique soit entièrement disponible. On peut cependant la considérer comme une option, si les émissions générées, par la chaîne de fabrication, sont très élevées, dans une installation particulière.

### **Performances environnementales**

Les niveaux d'émission, qu'on peut obtenir avec les tours de lavage à garnissage, avec de l'eau de procédé comme liqueur de lavage, dans l'industrie de la laine minérale, sont présentés dans le Tableau 4.29. La performance est limitée, pour les particules, par la faible chute de pression, et pour les substances gazeuses, par l'emploi d'eau de procédé, comme milieu de lavage. Avec le lavage à l'eau propre, on devrait obtenir des niveaux d'émission nettement inférieurs, pour le phénol, le formaldéhyde et l'ammoniac. L'équilibre de l'eau de procédé est un facteur critique et il est possible, dans certains cas rares, produit contenant peu de liant, après une période prolongée avec un produit à forte teneur en liant, que l'efficacité du dépoussiéreur soit négative, pour les composants gazeux.

Certains industriels utilisent des laveurs ionisants, depuis quelques années, mais dans l'ensemble, les résultats sont décevants. L'amélioration de l'efficacité, par rapport aux tours de lavage, est en général inférieure à 10 %.

Aucune expérience de lavage chimique ou en plusieurs étages n'a été faite par l'industrie, mais des expériences dans l'industrie chimique suggèrent qu'on pourrait facilement obtenir des valeurs inférieures à 10 mg/m<sup>3</sup> pour le phénol, le formaldéhyde et l'ammoniac, si les problèmes annexes pouvaient être résolus. Par rapport aux chiffres du Tableau 4.29, on observe uniquement une amélioration significative pour l'ammoniac.

### **Aspects financiers**

Les coûts, liés à cette technique, sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. L'ajout d'une phase ionisante, comme dans le laveur hydraulique ionisant, implique une augmentation des coûts d'investissement d'environ 75 % et une hausse de 10 % environ des coûts d'exploitation. Les coûts du lavage chimique multi-étage pourraient atteindre deux fois les chiffres, donnés dans le tableau. Le coût d'un dépoussiéreur multi-étage mixte serait probablement plus comparable. Il faudrait cependant entièrement séparer les étages. Mais cette solution augmenterait les coûts et il pourrait être nécessaire d'utiliser des matériaux anticorrosion plus onéreux.

### **Applicabilité**

En principe, les tours de lavage à garnissage, avec de l'eau de procédé, sont applicables à toute l'industrie. La technique n'est pas limitée aux nouvelles installations ou aux installations modifiées. Mais les coûts devraient être plus élevés pour les installations existantes. Dans certaines applications, notamment la laine de roche, d'autres techniques peuvent être utilisées, pour obtenir des niveaux d'émission similaires ou inférieurs.

Pour la production de laine de verre, un peu moins de 20 % des installations sont équipées de tours de lavage, pour les rejets cumulés de la zone de formage et du four pour traitement

thermique, ou pour la zone de formage seule. Pour la production de laine de roche, les tours de lavage équipent environ 10 % des installations, pour les émissions dues à la zone de formage et le même pourcentage pour la zone de cuisson. En général, les émissions des deux zones ne sont pas combinées, dans les installations de laine de roche.

### Autres aspects annexes

Pour les dépoussiéreurs hydrauliques, il est important de prendre en compte le risque de pollution croisée des autres milieux, si des effluents aqueux nécessitant un traitement étaient générés. Dans le secteur de la laine minérale, ce problème a été évité en utilisant de l'eau de procédé, comme milieu de lavage, avec 100 % de recyclage dans le circuit d'eau. L'emploi d'eau propre ou de substances chimiques se traduirait par la production d'effluents aqueux.

Un des intérêts de cette technique est la possibilité de cumuler les rejets de la zone de formage et ceux du four, pour traitement thermique, en une seule phase de traitement. Le volume des déchets gazeux de la zone de formage représente en général dix fois celui du four pour traitement thermique. S'il est mis en place au moment de la conception, le regroupement des déchets gazeux ne représente pas un surcoût énorme, par rapport au coût global de la technique.

### Exemples d'installations

Owens Corning Building Products, RU, Ltd. St Helens. Royaume-Uni.  
Pfleiderer Delitzsch, Allemagne  
Isover Orange, France

#### 4.5.6.1.3 Précipitateurs électrostatiques humides

##### Description de la technique

Les principes de base et le fonctionnement des PE sont décrits au Paragraphe 4.4.1.2. Dans les précipitateurs électrostatiques humides, les matières recueillies sont éliminées des plaques collectrices, par rinçage avec un liquide approprié, en général de l'eau, de manière intermittente, ou par arrosage en continu. Les trois principaux types, plaque et fil, plaque et plaque, tube et fil, peuvent tous être utilisés par voie humide. Dans les modèles à plaques, le flux de gaz est horizontal, dans les modèles à tubes, il est vertical, le liquide s'écoulant à contre-courant du gaz. Dans certains modèles plus robustes, les fils sont remplacés par des tiges. Un mécanisme est généralement prévu pour éliminer les gouttelettes d'eau, avant évacuation, par un dévésiculeur, ou parfois en utilisant le dernier champ à sec.

Alors qu'en général la précipitation à sec est préférable, les précipitateurs humides servent à dépoussiérer les gaz humides, dont la température est proche du point de rosée, et à collecter les aérosols liquides et les matières visqueuses, comme les particules résineuses ou les goudrons. La performance des précipitateurs électrostatiques humides dépend moins des propriétés des particules, car l'humidité présente dans le gaz, précipite aisément et favorise la précipitation des poussières difficiles.

On rencontre plus fréquemment des unités tubulaires, pour les applications humides, et il est plus facile de les protéger contre les explosions en présence de goudrons. Toutefois, les unités tubulaires ne sont souvent munies que d'un seul champ électrique, ce qui ne leur permet pas d'être très performantes. Les trois types de précipitateurs ont été utilisés, dans la fabrication de la laine minérale. Mais on préfère aujourd'hui les modèles plaque et fil et tube et fil. En général, un dispositif d'extincteurs à jets multiples est installé, pour éteindre les incendies.

A l'entrée du PEH, les gaz d'échappement doivent être bien répartis, afin d'obtenir une vitesse faible et uniforme, entre tous les éléments. Le gaz résiduel est conditionné par les jets à impact, en amont du PEH, les matières fibreuses les plus grosses sont éliminées et le gaz est saturé et refroidi. Pour assurer l'exploitation, dans la fourchette des paramètres théoriques, on utilise également de l'eau propre, qui est pulvérisée à l'entrée du précipitateur, pour assurer la saturation, et qui sert aussi à nettoyer les électrodes. Dans les opérations de fabrication de la laine de verre, le volume de cette eau est généralement assez faible, pour être évacué dans le circuit d'eau de procédé, et il peut représenter le plus gros du volume du circuit. Pour la production de laine de roche, le risque d'évaporation, par le procédé de formage, est beaucoup moins important, et il n'est pas possible d'utiliser un tel volume d'eau propre.

### Performances environnementales

Les PE humides sont efficaces pour l'élimination des particules, des aérosols et des gouttelettes, dont la taille varie de 10  $\mu\text{m}$  à 0,01  $\mu\text{m}$ . Leur performance dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment la vitesse d'écoulement du gaz. Un nouveau précipitateur humide spécialement conçu permettrait d'obtenir un taux d'élimination de plus de 98 % des particules totales, de plus de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre. Mais cette efficacité tombe rapidement, pour les particules de moins de 1  $\mu\text{m}$ . La performance peut décroître avec le temps, et la maintenance est un facteur très important.

En général, les PE humides présentent une efficacité limitée, pour l'élimination des substances gazeuses. Celle-ci dépend en grande partie de la gamme de produits et des propriétés chimiques du liant et de l'eau de procédé. Toutefois, avec un taux élevé de saturation et une grande consommation d'eau propre, on peut obtenir un certain degré d'absorption des substances gazeuses.

Les chiffres obtenus avec cette technique sont donnés dans le Tableau 4.29.

### Aspect financier

Les coûts liés à cette technique sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation.

### Applicabilité

En principe, la technique est applicable à tous les procédés de fabrication de laine de verre et de roche, nouveaux ou existants. Le principal inconvénient, pour la laine de roche, est l'éventuelle difficulté à éliminer les effluents aqueux. La technique convient, tant pour les rejets de la zone de formage, que pour les rejets du four pour traitement thermique, ainsi que pour les émissions cumulées. En 1997, environ 30 % des installations de laine de verre utilisaient cette technique pour les rejets séparés ou cumulés, provenant du formage et de la cuisson. Aucune installation de laine de roche n'était équipée de précipitateur humide.

### Autres aspects annexes

#### Avantages :

- Bonnes performances pour les particules et pour les gouttelettes/aérosols, résultat possible :  $<20 \text{ mg/m}^3$ .
- L'absorption des substances gazeuses est possible, avec une saturation élevée et l'utilisation d'eau propre.
- Applicable aux rejets de formage et de cuisson.
- Faible chute de pression, d'où des coûts d'exploitation et une consommation d'énergie relativement faibles.

- Les blocages sont rares si on utilise des jets à impact, pour éliminer les matières fibreuses de gros diamètre.
- Durée de vie prolongée pour une maintenance minimum.

### Inconvénients :

- Production d'effluents aqueux. Ils sont généralement recyclables pour la laine de verre, mais beaucoup moins pour la laine de roche.
- Consommation d'énergie. Elle est cependant relativement réduite, en comparaison d'autres exigences industrielles.
- Dépenses d'investissement relativement élevées.
- Encombrement important.
- La maintenance est minimum mais cruciale. Une mauvaise maintenance entraîne une chute considérable des performances.
- La haute tension implique des normes de sécurité.

**Tableau 4.26 : Principaux avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques humides**

### **Exemples d'installations**

Owens Corning Building Products, RU, Ltd. St Helens. Royaume-Uni  
G + H. Speyer, Allemagne  
Isover Etten-Leur, Pays-Bas

#### **4.5.6.1.4 Filtres en laine de roche**

##### **Description de la technique**

Les procédés classiques de filtration passive, par exemple les filtres à manche, ne sont pas adaptés au traitement des déchets gazeux, provenant des opérations de formage et de cuisson. La nature visqueuse et parfois humide du gaz entraînerait un colmatage rapide, même avec un nettoyage intensif et un bon entretien. Pour les activités, liées à la laine de roche, au cours desquelles les opérations de formage sont souvent réalisées à sec, on peut utiliser des filtres à plaques en laine de roche. Ils sont constitués d'un châssis en acier ou en béton, dans lequel les plaques de laine de roche, montées sur des cassettes, servent de filtres. Ce type de filtre est très performant, pour l'élimination des particules et des gouttelettes de liant, mais peu efficace, pour l'épuration des composants gazeux. La couche filtrante doit être changée régulièrement, de façon à conserver son efficacité et éviter une augmentation de la résistance à l'écoulement d'air. Les plaques filtrantes usagées peuvent en général être recyclées dans le four, si des activités de briquetage existent sur le site.

La filtration peut être un procédé demi-sec mais l'efficacité globale est nettement améliorée si l'opération se fait à sec. Aucun de ces systèmes n'engendre d'effluents aqueux et les plaques filtrantes humides peuvent être recyclées par un procédé de briquetage.

Une version antérieure de ce modèle était formée d'un filtre vertical, dont la couche filtrante était composée de rouleaux de laine de roche. Cette technique est moins efficace et a été largement remplacée par les modèles de plaques montées sur cassettes. Le filtre vertical était plus adapté aux déchets gazeux, ayant une forte teneur en liant humide, mais ne pouvait pas traiter les déchets gazeux sortant des jets à impact.

##### **Performances environnementales**

Les filtres en laine de roche sont très efficaces, pour l'élimination des particules et des aérosols/gouttelettes. Les valeurs d'émission qui peuvent être obtenues avec cette technique sont présentées au Tableau 4.29. Cette technique n'a pas d'effet significatif sur les substances gazeuses, mais en association avec des mesures primaires de réduction des polluants, par exemple opération à sec, et un faible rejet d'aérosols, les niveaux présentés dans le tableau sont atteints. Avec ce type de filtre, la visibilité du panache est très faible.

### Aspect financier

Les coûts liés à cette technique sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. Les coûts d'infrastructure sont particulièrement bas et la faible chute de pression entraîne des coûts d'exploitation peu élevés, par rapport à d'autres systèmes classiques de filtration.

### Applicabilité

Cette technique a surtout été limitée aux zones de formage, pour la fabrication de la laine de roche, mais elle est parfois appliquée également aux fours pour traitements thermiques. La technique est applicable à tous les procédés de fabrication de laine de roche, nouveaux ou existants. 90 % des installations de laine de roche utilisent cette technique de traitement des déchets gazeux de la zone de formage et un peu moins de 10 % l'utilisent pour les rejets des fours pour traitements thermiques. L'emploi limité de la laine de roche, dans les four, pour traitements thermiques s'explique en partie par la haute température du gaz, mais aussi par l'utilisation généralisée de l'incinération.

Il n'existe aucune application connue de la technique, dans la fabrication de la laine de verre. Les principales raisons de cette situation sont expliquées ci-dessous.

Le caractère continu de la production de laine de verre nécessite un dispositif de nettoyage continu, pour empêcher l'accumulation de matières, dans les conduits d'aspiration et dans le ventilateur. La technique normale fait intervenir des jets à impact. Ceux-ci ne sont pas utilisés en général dans la production de laine de roche, car le caractère discontinu de la production fournit l'occasion de nettoyer les conduits. Par ailleurs, dans la production de laine de roche, on utilise moins de liant et l'accumulation de matière est plus lente.

Dans le procédé de fabrication de la laine de roche, la fibre est habituellement recueillie sous la forme d'un matelas, d'épaisseur constante, qui est ensuite couché sur un transporteur de formage autonome, pour donner les propriétés souhaitées au produit. Le premier matelas est fin. Il ne nécessite qu'une chute de pression faible et constante et permet d'utiliser un seul système d'extraction de volume relativement faible. Pour la fabrication de la laine de verre., on utilise un simple transporteur de formage. L'épaisseur du matelas augmente, le long du transporteur de formage, et varie selon le produit. Le changement de pression différentielle le long du transporteur nécessite l'emploi de plusieurs systèmes d'extraction de différentes capacités et l'ensemble de l'extraction d'air doit avoir une pression suffisamment élevée, être variable et contrôlable. Le taux et la répartition de l'extraction sont des outils importants dans le contrôle du procédé, qui est souvent modifié par les industriels. Les conditions variables de volume et de pression plus élevés, des déchets gazeux issus de la production de laine de verre, ne sont pas idéales pour les systèmes de filtration.

La forte teneur en liant saturé d'eau, dans les déchets gazeux issus de la zone de formage de la laine de verre, provoquerait un colmatage rapide du filtre de laine de roche. Il faudrait donc changer fréquemment la couche filtrante et on obtiendrait un taux élevé de déchets humides qu'il faudrait recycler et éliminer.

Une autre complication, associée à l'utilisation de filtres en laine minérale pour la fabrication de la laine de verre, est la difficulté à recycler les matières dans le four. Le recyclage des déchets fibreux, dans les fours de laine minérale, est examiné au Paragraphe 4.7.

### Autres aspects annexes

#### Avantages :

- Bonnes performances pour les particules, résultat possible :  $<20 \text{ mg/m}^3$ .
- Les plaques filtrantes usagées peuvent être recyclées dans le circuit de fabrication, si les installations le permettent.
- Pas de production de déchets aqueux.
- Faibles coûts d'investissement.
- Faible chute de pression, d'où des coûts d'exploitation et une consommation d'énergie relativement faibles.

#### Inconvénients :

- Consommation d'énergie. Elle est cependant relativement réduite, par rapport à d'autres techniques secondaires.
- Efficacité limitée pour l'élimination des substances gazeuses.
- N'est pas jugé applicable aux procédés de fabrication de laine de verre.

**Tableau 4.27 : Principaux avantages et inconvénients des filtres en laine de roche**

### Exemples d'installations

Rockwool Lapinus, Roermond, Pays-Bas  
Partek Rockwool, Hallekis, Suède

#### 4.5.6.2 Four pour traitement thermique

Le matelas de produit humide pénètre dans le four pour traitement thermique, chauffé à environ  $250^\circ\text{C}$ . L'humidité est chassée, ainsi que d'éventuelles matières volatiles, et le liant commence à sécher. La température et la durée de séjour sont primordiales. La liaison réticulaire doit être satisfaisante, mais le liant ne doit pas être trop sec, car la qualité du produit en souffrirait. Les rejets sont constitués par les matières volatiles du liant, les produits de décomposition du liant et les produits de combustion, issus des brûleurs du four pour traitement thermique. En général, les produits de laine de verre contiennent des taux de liant un peu plus élevés que les produits de laine de roche, ce qui entraîne des rejets plus importants. Les rejets du four pour traitement thermique ont également tendance à dégager une odeur, s'ils ne sont pas traités.

L'étuve fonctionne généralement au gaz et elle est équipée d'un dispositif d'extraction. Les émanations sont visqueuses et représentent un risque d'incendie, dû au dépôt de matières combustibles dans le circuit d'extraction, en particulier dans les fours pour traitements thermiques de laine de verre. Pour éviter les feux, il faut soit épurer les effluents gazeux à l'eau, soit augmenter la chaleur, pour détruire la propriété visqueuse des polluants. Dans les opérations sans incinération, de l'eau est généralement pulvérisée, dans les conduits d'extraction, pour empêcher l'accumulation de matières résineuses et éviter les feux. La pulvérisation d'eau permet également d'éliminer une partie des matières entraînées avec les effluents gazeux.

##### 4.5.6.2.1 Jets à impact et cyclones



## Description de la technique

La technique est décrite au Paragraphe 4.5.6.1.1 ci-dessus, mais plusieurs autres problèmes doivent être examinés. Les déchets gazeux, issus du four pour traitement thermique, ont un volume bien inférieur et une température plus élevée, que ceux issus de la zone de formage. C'est pourquoi, notamment pour la laine de verre, l'accumulation de matières résineuses représente un risque d'incendie et même d'explosion. L'eau pulvérisée dans le gaz a une action réfrigérante importante, et certaines substances, issues des déchets gazeux, sont condensées. Cela ne veut pas forcément dire que les substances sont éliminées et, dans la première partie du circuit, des matières, contenues dans l'eau sale de procédé, seront volatilisées.

## Performances environnementales

En raison de la faible chute de pression, l'efficacité d'élimination des particules fines est assez réduite. Comme dans la zone de formage, le système est un équilibre dynamique et les émissions gazeuses dépendent en grande partie des propriétés chimiques de l'eau de procédé et du liant. Les chiffres obtenus avec cette technique sont présentés dans le Tableau 4.29.

## Aspect financier

Les coûts liés à cette technique sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. Les questions relatives à la proportion du coût que représentent les mesures de réduction des polluants sont les mêmes que pour la zone de formage.

## Applicabilité

Comme pour la zone de formage, cette technique est en principe applicable à tous les procédés de laine minérale. Elle n'est pas beaucoup utilisée dans les installations de laine de roche, car elle n'est pas jugée indispensable, et pourrait nuire aux performances d'autres techniques. Pour les émissions du four pour traitement thermique, les jets à impact et les cyclones sont utilisés dans 90 % des installations de laine de verre, souvent avec cumul des rejets des zones de formage et de cuisson, et dans environ 10 % des installations de laine de roche, que ce soit séparément ou en parallèle, avec d'autres techniques par voie humide.

### 4.5.6.2.2 Dépoussiéreurs hydrauliques

La technique est décrite pour la zone de formage au Paragraphe 4.5.6.1.2 et l'étude s'applique de la même manière aux rejets du four pour traitement thermique. Les aspects à retenir sont que le volume est bien inférieur et que les concentrations de polluants sont différentes, en général les particules sont moins importantes, le phénol est comparable, mais l'ammoniac et le formaldéhyde sont beaucoup plus élevés.

Les niveaux d'émission qu'on peut atteindre, avec les tours de lavage à garnissage, l'eau de procédé étant utilisée comme liqueur de lavage, dans l'industrie de la laine minérale, sont donnés dans le Tableau 4.29 et l'étude est présentée au Paragraphe 4.5.6.1.2. Les rejets du four pour traitement thermique sont relativement plus élevés en termes de déchets gazeux que les rejets de formage, et l'efficacité globale peut être supérieure. Là encore, cela dépend de la quantité d'eau propre utilisée, et des propriétés chimiques du liant et de l'eau de procédé.

Les coûts, liés à cette technique, sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. Les chiffres sont donnés pour les rejets cumulés de formage et de cuisson. La plupart des exemples de rejets de cuisson, traités par des dépoussiéreurs hydrauliques, concernent des rejets cumulés et, en raison du faible volume, le surcoût est en général peu important. La variation dans les coûts présentés ici est en grande

partie fonction du débit d'air. On peut effectuer une estimation approximative du seul traitement des émissions de cuisson, en réduisant le coût proportionnellement, mais la relation entre les coûts n'est pas linéaire.

En principe, la technique est applicable à toutes les installations. L'étude est proposée au Paragraphe 4.5.6.1.2.

### 4.5.6.2.3 Précipitateurs électrostatiques humides

La technique est décrite, pour la zone de formage, au Paragraphe 4.5.6.1.3 et l'étude s'applique de la même manière aux rejets de cuisson. L'utilisation des précipitateurs humides, pour traiter les seuls rejets de cuisson, n'est pas généralisée et les installations sont souvent prévues pour des rejets cumulés. En raison des concentrations relatives, plus élevées en substances gazeuses et odorantes, dans le gaz résiduaire issu du four pour traitement thermique, on ne choisirait pas en priorité les précipitateurs humides, comme technique de réduction des seuls rejets de cuisson. Mais, lorsque ceux-ci sont cumulés avec les rejets de formage, et étant donné la dilution inhérente que cela implique, un précipitateur humide peut être une option logique.

Les niveaux d'émission obtenus avec cette technique sont présentés dans le Tableau 4.29 et les coûts dans le Tableau 4.30. En principe, la technique est applicable aux installations nouvelles et existantes.

### 4.5.6.2.4 Incinération des déchets gazeux

#### Description de la technique

L'incinération est très répandue, pour limiter les émissions organiques issues des activités industrielles. Elle présente l'inconvénient de détruire les matières, ce qui empêche de les récupérer, nécessite souvent un surplus d'énergie et dégage du dioxyde de carbone et des oxydes d'azote. Néanmoins, elle peut être mise en œuvre de manière à consommer peu d'énergie et servir de source de chaleur, pour les opérations de séchage et de cuisson. Les incinérateurs sont de deux types, thermiques,  $> 750^{\circ}\text{C}$ , ou catalytiques,  $350$  à  $400^{\circ}\text{C}$ .

L'incinération thermique détruit les composés organiques, par oxydation thermique en dioxyde de carbone, eau, oxydes de soufre et d'azote et autres produits de combustion. Les principaux critères d'une bonne combustion sont :

- Le temps de séjour dans la chambre de combustion doit être suffisant pour assurer une combustion complète. Le taux de destruction de 99 % nécessite en principe un temps de séjour de 1 à 4 secondes à la température appropriée.
- La température de service doit être supérieure de  $200$  à  $400^{\circ}\text{C}$ , au point d'auto-inflammation de la substance la plus stable, normalement les températures de service se situent autour de  $800^{\circ}\text{C}$ . Lorsque les effluents gazeux contiennent des substances chlorées et aromatiques, les températures doivent être augmentées de  $1100$  à  $1200^{\circ}\text{C}$ , et les gaz de combustion doivent être rapidement refroidis, pour empêcher la formation de dioxines.
- Une turbulence est nécessaire, pour optimiser la chaleur et le transfert des matières, dans la zone de combustion, et éviter les "points froids". Pour cela, on utilise des brûleurs qui dégagent une flamme tourbillonnante, et on installe des dérivations, dans la chambre de combustion.

L'incinération catalytique a peu de chances d'être une option applicable à cette industrie, car la forte teneur en particules et la présence de matières résineuses, entraîneraient l'empoisonnement du catalyseur.

### Performances environnementales

L'incinération est une technique très performante, pour supprimer les substances organiques des effluents gazeux, mais qui ne permet pas de réduire les particules inorganiques. L'oxydation des matières organiques provoque des émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> qui, dans les quantités émises, sont estimées préférables aux substances détruites. Les déchets gazeux, émanant des fours pour traitements thermiques, contiennent aussi de l'ammoniac et d'autres substances contenant de l'azote, qui sont partiellement ou totalement oxydés, pour former des NO<sub>x</sub>. Un incinérateur bien conçu permettra de réduire les composés organiques totaux, à moins de 10 mg/m<sup>3</sup>. Les chiffres pouvant être obtenus, avec cette technique, sont présentés dans le Tableau 4.29.

### Aspects financiers

Les coûts, liés à cette technique, sont présentés dans le Tableau 4.30 et dépendent largement du débit d'air et de la taille de l'installation. Le bilan économique dépend en grande partie des possibilités de récupérer la chaleur. Les coûts sont fonction d'un certain nombre de facteurs, notamment :

- le volume de gaz résiduel à traiter, ce qui détermine les dimensions de la chambre de combustion
- la température du gaz résiduel qui intervient sur la conception de l'équipement de combustion et les besoins supplémentaires en combustible
- la valeur calorifique du gaz, qui intervient sur les besoins supplémentaires en combustible
- la température de combustion, qui détermine la nature des matériaux de construction
- les équipements de mesure
- les options de récupération de chaleur
- les conditions d'installation à l'intérieur, à l'extérieur, au niveau du sol, sur le toit, etc.

### Applicabilité

Au moment de la rédaction de ce document, la technique n'est utilisée que pour traiter les rejets de cuisson de la laine de roche, 60 à 70 % des installations ont adopté cette technique. En raison du volume important, de la faible concentration, température et quelquefois de la teneur élevée en eau, le coût de cette technique est jugé prohibitif, pour les déchets gazeux de la zone de fromage. En principe, la technique est applicable, tant pour des procédés nouveaux, que pour des procédés existants.

Les fours pour traitements thermiques de laine de roche fonctionnent à des pressions différentielles relativement élevées, en raison d'une moins bonne perméabilité à l'air du produit. Cette situation implique une régulation assez sophistiquée de la pression et se traduit par une extraction à faible débit et température élevée, variable selon le produit fabriqué, ce qui fait que l'incinération est une option intéressante.

La cuisson de la laine de verre fait intervenir une pression différentielle inférieure et ne nécessite pas une plage de régulation aussi importante, le gaz résiduel ayant en général un plus grand volume et une température inférieure. C'est pourquoi l'incinération est une option moins intéressante qui, associée à la disponibilité de l'eau de procédé, a conduit l'industrie à privilégier le dépoussiérage hydraulique. Dans les installations de laine de verre, on trouve en général l'option de cumuler les rejets de cuisson avec les rejets de fromage, qui sont traités par un procédé unique, ce qui est souvent bien plus économique. En principe, il n'existe aucune raison technique qui empêcherait de réduire par incinération les émissions liées à la cuisson de la laine

de verre. Toutefois, cette opération est en général beaucoup plus onéreuse que pour la laine de roche et n'est pas forcément la solution la plus rentable.

### Autres aspects annexes

#### Avantages :

- Très efficace pour la destruction des polluants et odeurs organiques.
- Pas de production de déchets aqueux ou solides.
- Coûts relativement bas dans les applications appropriées.

#### Inconvénients :

- Consommation d'énergie, car la valeur calorifique du gaz n'est pas suffisante pour assurer la combustion.
- Emission de dioxyde de carbone et d'oxydes d'azote.
- Efficacité médiocre pour les particules inorganiques.
- Les coûts sont beaucoup plus élevés pour la laine de verre.

**Tableau 4.28 : Principaux avantages et inconvénients de l'incinération**

### Exemples d'installations

Rockwool Lapinus, Roermond. Pays-Bas  
Partek Rockwool, Hallekis. Suède  
Owens Corning, Queensferry. Royaume-Uni

#### 4.5.6.3 Refroidissement des produits

Une grande quantité d'air, normalement entre 10 000 et 40 000 m<sup>3</sup>/h, doit traverser le produit pour le refroidir à une température acceptable, après la sortie du four pour traitement thermique. Ce gaz contient probablement des fibres, des particules de liant cuit, et de faibles quantités de fumées organiques, qui peuvent être malodorantes. Ces effluents gazeux ne constituent pas un sujet préoccupant, pour l'industrie, mais peuvent poser des problèmes localement. Il existe trois méthodes principales, pour traiter le gaz, dont on trouve des exemples dans ce secteur d'activités. Elles sont toutes considérées comme disponibles et abordables. Ces trois méthodes permettent d'obtenir des niveaux d'émission relativement bas et l'option privilégiée dépendra des conditions locales. Dans certains cas, lorsque les rejets sont très faibles, une réduction supplémentaire des polluants n'est pas forcément nécessaire.

- Un dispositif de filtration pour dépoussiérer, associé à une vitesse et une hauteur de rejet suffisantes pour éviter les odeurs au niveau du sol.
- Un dispositif de dépoussiérage hydraulique, associé à une dispersion satisfaisante. Un système à venturi donnerait les taux les plus bas de rejet de particules et de fumées.

- Traitement combiné de l'air de refroidissement et des déchets gazeux des zones de formage et de cuisson.

L'option du traitement combiné est probablement la méthode la plus performante, sur le plan écologique et économique.

#### 4.5.6.4 Usinage et conditionnement des produits

Le traitement de la laine minérale fait intervenir un certain nombre d'opérations de broyage, de découpe et de refendage, qui génèrent des poussières. La méthode, admise pour traiter ces émissions, consiste à capter et à extraire les poussières de la manière la plus efficace possible, puis à envoyer l'air extrait dans un dépoussiéreur performant, en général un filtre à manches. Les opérations de conditionnement sont également des sources potentielles de rejet de poussières et doivent être traitées de la même manière.

Les volumes de gaz, provenant de ces opérations, peuvent être très variés, 5000 à 70000 m<sup>3</sup>/h. Pour minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation, des installations de réduction des polluants. Les volumes d'air extrait doivent être réduits au minimum, après un dépoussiérage efficace.

#### 4.5.6.5 Odeurs provenant de la production de laine minérale

L'évaluation technique des odeurs est difficile, onéreuse et subjective et il existe peu d'informations sur le sujet. Quoi qu'il en soit, les odeurs dégagées par les installations de fabrication de laine minérale font parfois l'objet de plaintes de la part des riverains. Ce problème s'est atténué depuis quelques années, avec l'amélioration des procédés, et des contrôles. Mais reste un point délicat, pour de nombreuses installations. Ce paragraphe analyse le problème des odeurs, dans tous les aspects du traitement, y compris la fusion.

Les fours classiques, air-gaz ou les fours oxycombustion, n'engendrent pas en général de problèmes d'odeur, même lors de la fusion de matière recyclée, en raison des températures très élevées. Les fours électriques, à voûte froide, entraînent rarement de problèmes d'odeurs, sauf lorsque des déchets de laine minérale sont recyclés. Les matières liantes peuvent subir une décomposition thermique partielle, au cours de la fusion, en dégageant parfois des substances malodorantes. Ce problème peut être minimisé, par l'addition d'agents oxydants ou un traitement préalable de la fibre.

La fusion en cubilot occasionne d'importantes émissions de sulfure d'hydrogène d'une odeur désagréable. La solution admise est la post-combustion, qui permet aussi de traiter n'importe quels autres dégagements d'odeur, provenant de matières premières ou recyclées.

Ce sont les opérations en aval qui constituent les principales sources d'odeur, notamment le formage et la cuisson. Des odeurs peuvent également provenir du refroidissement du produit, en particulier lorsqu'il est dense, qu'il contient une forte teneur en liant, ou en cas d'excès de cuisson. L'odeur de chaque produit chimique, intervenant dans le procédé, n'est pas considérée comme particulièrement importante. Ces effluves sont surtout dégagées par les réactions chimiques et thermiques, du liant organique utilisé. L'odeur est caractéristique de la bakélite brûlée. Les odeurs de formaldéhyde ou d'ammoniac font rarement l'objet de plaintes à l'extérieur des installations.

On pense que la plupart des odeurs proviennent du four pour traitement thermique où ont lieu les principales réactions chimiques et thermiques. L'opération de séchage occasionne également un certain degré de distillation par la vapeur des composés et formes intermédiaires du liant. L'intérieur de la majorité, des fours pour traitements thermiques, montre une accumulation de

matières fibreuses et résineuses qui, elle aussi, peut produire des composés malodorants, sous l'influence de la température. De petits incendies et quelques cas localisés de feux couvants, ne sont pas rares, dans les fours pour traitements thermiques, et les fumées et vapeurs dégagées peuvent avoir une odeur très forte.

Les émanations d'odeurs peuvent être nettement limitées par un entretien et un nettoyage satisfaisants, des dispositifs de dépoussiérage hydraulique, une dispersion appropriée et les équipements nécessaires, pour l'extinction rapide des feux. L'incinération des déchets gazeux, issus du four pour traitement thermique, est une solution particulièrement efficace au problème.

Les activités de formage, elles aussi, peuvent se traduire par la production de composés malodorants, notamment lorsque le liant est pulvérisé sur les fibres chaudes. Toutefois, l'atmosphère est plus froide et on y rencontre donc une plus grande humidité, que dans le four pour traitement thermique. Les volumes de gaz sont beaucoup plus élevés et les concentrations en composés odorants sont diluées. Bien qu'une quantité considérable de composés odorants puisse être dégagée, dans la zone de formage, une odeur "existe" uniquement si le composé se trouve à une concentration supérieure aux valeurs limite de perception des odeurs ; c'est pourquoi les émissions de la zone de formage sont souvent moins odorantes que les émissions du four pour traitement thermique. Lorsque les rejets de la zone de formage génèrent des odeurs, celles-ci peuvent être réduites, par le dépoussiérage hydraulique et une dispersion appropriée. Les odeurs problématiques peuvent être traitées par le dépoussiérage hydraulique, avec un agent oxydant. Mais cette opération doit être séparée du circuit d'eau de procédé. Les questions liées au lavage chimique sont développées au Paragraphe 4.5.6.1.2.



Substance mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne produit)	Particules	Phénol <sup>(1)</sup>	Formaldéhyde <sup>(1)</sup>	Ammoniac <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	COV <sup>(1)(2)</sup>	Amines <sup>(1)(4)</sup>
<b>Fibrage et formage</b>								
Mesures primaires	100 (3,6)	20 (0,8)	15 (0,5)	125 (4,0)			50 (2,2)	20 (0,7)
Filtre en laine de roche	20 (0,7)	15 (0,5)	10 (0,4)	75 (2,5)			25 (1,0)	10 (0,4)
Jet à impact + cyclone	50 (1,8)	15 (0,6)	8 (0,3)	65 (3,0)			30 (1,8)	15
Jet à impact + cyclone + PEH	20 (1,2)	15 (0,6)	8 (0,3)	65 (3,0)			30 (1,8)	15
Jet à impact + cyclone + TLG	50 (1,8)	12 (0,5)	5 (0,25)	50 (2,5)			25 (1,6)	10
<b>Formage et cuisson combinés</b>								
Mesures primaires	100 (4,0)	20 (0,9)	15 (0,6)	125 (8,0)			50 (2,5)	20 (0,8)
Jet à impact + cyclone	50 (2,0)	15 (0,7)	8 (0,4)	65 (5,0)			30 (2,0)	15 (0,6)
Jet à impact + cyclone + PEH	20 (1,3)	15 (0,7)	8 (0,4)	65 (5,0)			30 (2,0)	15 (0,6)
Jet à impact + cyclone + TLG	50 (2,0)	12 (0,6)	5 (0,3)	50 (4,0)			25 (1,7)	10 (0,4)
<b>Cuisson seule</b>								
Mesures primaires	30 (0,4)	25 (0,1)	25 (0,1)	400 (4,0)	150 (0,5)	60000 (200)	50 (0,3)	10 (0,03)
Incineration	20 (0,1)	5 (0,02)	5 (0,02)	100 (0,4)	200 <sup>(3)</sup> (0,6)	80000 <sup>(3)</sup> (230)	10 (0,04)	5 (0,02)
Jet à impact + cyclone	30 (0,2)	10 (0,1)	8 (0,1)	65 (2,0)	150		20 (0,2)	5 (0,02)
Jet à impact + cyclone + PEH	20 (0,1)	10 (0,1)	8 (0,1)	65 (2,0)	150	60000 (200)	20 (0,2)	5 (0,02)
Jet à impact + cyclone + TLG	30 (0,2)	8 (0,1)	5 (0,1)	50 (1,5)	150		15 (0,1)	4

**Tableau 4.29 : Valeurs générales pouvant être obtenues pour l'émission atmosphérique générée par la chaîne de fabrication (mg/Nm<sup>3</sup>)**

Notes : PEH = Précipitateur électrostatique humide. TLG = Tour de lavage à garnissage. COV = Composé organique volatil

- (1) L'émission de composés issus du liant dépend de la formulation de celui-ci, de la technologie employée, des conditions d'exploitation, des taux de production, des exigences spécifiques à un produit, etc. Ces chiffres représentent les niveaux d'émission pouvant être obtenus dans la grande majorité des installations, appliquant ces techniques. Les mesures primaires concernent principalement des modifications apportées, à la formule des résines ou des liants, ces modifications ne pouvant pas être appliquées à tous les produits et à toutes les conditions d'exploitation. Lorsque les conditions sont défavorables, ces émissions peuvent être sensiblement plus élevées que ces valeurs, surtout si les mesures primaires sont les seules solutions mises en place. Toutefois, dans des circonstances favorables où des techniques secondaires ont été mises en œuvre, les émissions peuvent être nettement inférieures à ces chiffres.
- (2) Le nombre de mesures des COV est limité.

- (3) La valeur la plus élevée est supérieure à celle correspondant aux mesures primaires, en raison de l'incinération.
- (4) **Ces chiffres montrent l'effet de diverses techniques sur la concentration d'amine à l'admission d'environ 20 mg/Nm<sup>3</sup>. Mais comme mentionné au Paragraphe 4.5.6.1, on peut obtenir des rejets d'amine inférieurs à 5 mg/Nm<sup>3</sup>, par une modification de la formule des résines/liants.**

Technique de réduction des polluants	Débit moyen (Nm <sup>3</sup> /h)	Coûts d'investissement pour un procédé nouveau (millions d'euros)	Coûts d'investissement pour des installations existantes (millions d'euros)	Coûts d'exploitation (millions d'euros par an)
<b>Formage et cuisson</b>				
Mesures primaires	-	-	-	-
Jet à impact + cyclone	200000 (-50000, + 100000)	1,3 ± 30 %	1,6 ± 40 %	0,1 ± 0,02
Jet à impact + cyclone + PEH	200000 (-50000, + 100000)	3,8 ± 30 %	4,6 ± 40 %	0,12 ± 0,02
Jet à impact + cyclone + TLG	200000 (-50000, + 100000)	3,5 ± 30 %	4,2 ± 40 %	0,21 ± 0,02
<b>Formage seul</b>				
filtre à plaques en laine de roche	200000 (± 50000)	1,3 ± 30 %	1,5 ± 30 %	0,2 ± 0,1
<b>Cuisson seule</b>				
Incinérateur	20000 (-5000, + 10000)	1,3 ± 40 %	1,6 ± 30 %	0,2 ± 0,1
<b>Cheminée</b>	250000 (-50000 + 100000)	0,7 ± 40 %	0,8 ± 40 %	

**Tableau 4.30 : Coûts d'investissement et d'exploitation des techniques de réduction des polluants**

#### 4.5.7 Fibre céramique

Le principal problème pour l'environnement, dû à la fabrication de fibres céramiques, est le rejet à l'atmosphère de particules dans lesquelles peuvent se trouver des fibres céramiques. Par ailleurs, certaines activités secondaires peuvent engendrer des émissions de COV, en particulier pendant le séchage et la cuisson.

Les particules et les fibres peuvent être émises par un certain nombre d'opérations de fabrication, notamment le fibrage et le captage, l'aiguilletage, brûlage du lubrifiant, refendage, broyage, découpe, conditionnement et traitement secondaire. Toutes les zones d'émission de particules ou de fibres peuvent être équipées d'un dispositif efficace d'extraction vers un dépoussiéreur à couche filtrante.

Deux méthodes sont proposées pour l'extraction et la filtration de l'air chargé de particules, à savoir :

- La mise en place, à proximité de la source de rejet, d'une installation de filtration réservée à cet effet.
- L'extraction d'air, issu d'un grand nombre de sources différentes, vers une installation de filtration commune au moyen d'un collecteur.

L'installation la plus efficace est constituée d'un préfiltre, suivi d'un filtre secondaire haute efficacité, équipé d'un indicateur de chute de pression, et d'une surveillance continue des rejets à l'atmosphère. Le filtre secondaire haute efficacité permet d'avoir moins de rejets, et constitue une garantie en cas de défaillance du préfiltre. Lorsqu'une installation commune reçoit plusieurs sources, la mise en place d'un filtre secondaire risque de s'avérer extrêmement coûteuse. Les débits d'air élevés qui en résulteraient et la grande résistance du filtre secondaire nécessiteraient un gros ventilateur très puissant avec de gros besoins en énergie. Un système de filtration primaire bien conçu et utilisé efficacement permet d'atteindre des niveaux d'émission de l'ordre de  $1 \text{ à } 5 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $< 1 \text{ mg/Nm}^3$  pour les fibres.

Lorsque le procédé dépend de préfiltres, un dispositif de protection devrait être prévu, en cas de défaillance de la manche. De nombreuses installations sont équipées d'alarmes de chute de pression, qui ne devraient pas être les seuls dispositifs de surveillance.

La solution préconisée généralement est la mise en place de systèmes de filtration, avec un ventilateur d'extraction, installé du côté propre du sac filtrant, systèmes sous pression négative. Les systèmes à pression positive, avec le ventilateur du côté sale, constituent un risque car une éventuelle fuite, en aval du ventilateur, se traduirait par le rejet de matières.

Les cycles de nettoyage des dépoussiéreurs à couche filtrante peuvent être optimisés, pour garantir une performance maximale de filtration. Dans certaines applications, en particulier lorsqu'elles dégagent des rejets fibreux, un mécanisme de secouage est parfois plus efficace qu'un dispositif à décolmatage à contre-courant. En raison de la nature des matières recueillies, il est important de les manipuler et de les éliminer, de manière à éviter leur rejet dans l'atmosphère ou dans l'eau. Dans certains cas, il est possible de recycler les matières recueillies dans le four.

Des rejets organiques peuvent être dégagés, au cours du brûlage du lubrifiant, ou au cours des opérations de cuisson et de séchage, qui ont lieu pendant le traitement secondaire. L'expérience a montré que ces rejets ont tendance à être très faibles. Toutefois, si les émissions sont importantes, supérieures à  $100 \text{ g/heure}$ , elles peuvent être éliminées par des mesures primaires, modification des formules, ou des techniques standard de réductions, par exemple l'incinération ou l'absorption.

### 4.5.8 Fritte

Les activités en aval de la production de fritte n'entraînent pas d'émissions significatives dans l'atmosphère. Le doucissage et le granitage du produit sont en général réalisés par voie humide. Mais des mesures de dépoussiérage peuvent être nécessaires pour le broyage à sec, ainsi que pour les zones de conditionnement du produit sec. La technique la plus efficace est probablement l'extraction, suivie d'un dépoussiérage par un filtre à manches.

## 4.6 Techniques de lutte contre les émissions aqueuses

En général, les émissions aqueuses sont relativement faibles et peu de problèmes importants sont spécifiques à l'industrie du verre. Ce document ne traite pas des problèmes généraux d'émission dans l'eau, qui sont communs à des nombreux procédés industriels, et qui sont analysés en détail par les documents techniques. Ce paragraphe présente un bref résumé des problèmes d'ordre général et, si nécessaire, propose un supplément d'information, sur les questions spécifiques à la verrerie. D'une manière générale, l'eau est surtout utilisée pour le nettoyage et le refroidissement, et des méthodes standard permettent de la traiter et de la recycler, sans difficulté. Les principales sources éventuelles d'émission sont indiquées ci-dessous.

- Ecoulement des eaux de surface.

- Déversement ou fuites, lors du stockage des matières premières.
- Eau de drainage provenant de zones contaminées par des matières liquides ou solides.
- Eau utilisée pour le nettoyage du produit.
- Purge de l'eau de refroidissement, notamment des dispositifs à circuit fermé.
- Effluents des dépoussiéreurs hydrauliques.

A l'exception des eaux ménagères, les rejets ne contiennent en général que des matières solides de verre, des traces d'huile, des matières solubles pour la fabrication du verre, par exemple du sulfate de sodium, et des produits chimiques, pour le traitement de l'eau de refroidissement. Lorsque des matières potentiellement dangereuses sont utilisées, des mesures doivent être prises, pour éviter leur pénétration dans le circuit d'eau. Lorsque l'installation le permet, il conviendrait d'utiliser des systèmes de refroidissement en circuit fermé et de réduire les opérations de purge au minimum. Si nécessaire, des méthodes standard de lutte contre la pollution, peuvent être mises en œuvre, pour réduire encore les émissions, par exemple décantation, dégrillage, séparateurs d'huile, neutralisation et déversement dans le réseau urbain d'eaux usées.

Des procédures normalisées peuvent être adoptées pour lutter contre les rejets provenant du stockage de matières premières liquides et d'intermédiaires.

- Installation d'une enceinte de rétention de dimensions appropriées, mur de protection.
- Inspection/contrôle des réservoirs et des murs de protection pour en vérifier l'étanchéité.
- Protection contre les débordements, vannes d'arrêt, alarmes, etc.
- Installation d'évents et de points de remplissage à l'intérieur du mur de protection ou de toute autre enceinte de rétention.

Les problèmes spécifiques à la verrerie sont les suivants :

- Circuits d'eau de procédé de laine minérale.
- Effluents issus de la fabrication du fil de silionne.
- Verres spéciaux, verre pour TV.
- Gobeletterie, cristal au plomb 24%, cristal.

### **Laine minérale**

Dans des conditions normales, la fabrication de laine minérale consomme beaucoup d'eau, avec de grandes quantités de vapeurs d'eau, rejetées dans l'atmosphère au cours du formage et, dans une moindre mesure, de la cuisson. On n'observe aucun rejet spécifique d'eaux usées à l'exception des problèmes généraux, déjà mentionnés ci-dessus. La plupart des installations sont équipées d'un réseau d'eau de procédé, en circuit fermé, voir **Schéma 2.11**, et, lorsque cela est possible, les eaux de purge de refroidissement et de nettoyage sont envoyées dans ce réseau. Les eaux de nettoyage et les déversements de liant sont en général recyclés dans le réseau d'eau de procédé.

Le circuit d'eau de procédé dispose d'un volume limité, mais on peut y ajouter un réservoir de stockage, pour recueillir les trop-pleins qui sont ensuite renvoyés dans le circuit. La plupart des matières utilisées sont compatibles avec les propriétés chimiques de l'eau de procédé. De faibles quantités d'eaux contaminées peuvent émaner des enceintes de rétention, des déversements et du déshuilage des eaux. Lorsque les matières ne sont pas compatibles avec le circuit d'eau de procédé, elles peuvent être dirigées vers un réservoir de stockage. Etant donné leurs volumes peu importants, ces matières sont en général évacuées dans le réseau urbain d'eaux usées, ou envoyées dans un lieu de destruction hors du site. On peut utiliser les techniques mentionnées dans le Tableau 4.31, mais elles ne seront probablement pas économiques, pour de si petits volumes.

Le gros volume du circuit d'eau de procédé représente un risque de contamination des réseaux d'eau propre, comme l'eau de ruissellement ou l'eau de trempe contenant du calcin. Les circuits peuvent être conçus et utilisés, de manière à minimiser ce risque. Par exemple, les réseaux d'eau propre doivent être étanchéifiés, lorsqu'ils traversent des zones où une contamination peut se produire.

### Fil de silionne

Les rejets proviennent de la zone de formage, de la préparation du liant, du nettoyage, du refroidissement, de l'application du liant au tissu/matelas et des dispositifs d'épuration à l'eau. La principale source d'émission est la zone de formage. Etant donné la grande vitesse des bobineuses et le mouvement des filaments au cours du formage, une portion du liant est projetée et écrasée. Les principaux polluants des eaux usées non traitées sont les matières liantes elles-mêmes. Le soin apporté à la manutention, en particulier au cours de la préparation du liant, peut contribuer à réduire sensiblement les niveaux d'émission de ces zones.

Les espèces de polluants et leurs concentrations sont très variables, en raison des différents liants et des modes opératoires. Les concentrations en polluants, dans les eaux usées, sont parfois assez faibles, du fait de la dilution par l'eau de lavage. Mais les taux de polluants organiques sont élevés, en raison de la présence de matières liantes. Les effluents devront subir un traitement, soit après déversement dans le réseau urbain, soit sur site, en associant les techniques mentionnées au Tableau 4.31. Si les effluents sont évacués directement dans un cours d'eau, le traitement sur site le plus efficace est probablement un traitement biologique. Il faut toutefois que le dispositif de traitement soit soigneusement conçu et bien utilisé, car l'efficacité du traitement biologique peut quelquefois être mise en péril par de faibles concentrations et la forte proportion d'espèces polymères.

### Verres spéciaux

Le secteur des verres spéciaux est très divers et il n'est pas possible de répertorier tous les risques d'émission dans l'eau, ainsi que les techniques de réduction des polluants qui sont appropriées. La plupart des activités de ce secteur ne concernent que les questions générales décrites plus haut. Toutefois, la fabrication de certains produits, comme le verre pour TV, fait appel à des opérations de doucissage et de polissage, par voie humide, qui génèrent des effluents aqueux contenant les agents réfrigérants et de fines particules de verre, contenant du plomb. Ces effluents liquides peuvent être traités par l'association de plusieurs des techniques standard d'élimination des matières solides, mentionnées au Tableau 4.31 ci-dessous. Le plomb est en grande majorité insoluble et sa teneur totale dépend de la teneur en matières solides.

### Gobeletterie

En général, le secteur de la gobeletterie génère peu d'émissions dans l'eau. Comme pour les autres secteurs de l'industrie, on utilise principalement l'eau pour le refroidissement et le nettoyage et les rejets aqueux proviennent des purges des circuits de refroidissement, des eaux d'épuration et du ruissellement des eaux de surface. Certaines activités, en particulier la production de cristal au plomb 24% et de cristal, correspondent cependant à des émissions spécifiques, à savoir :

- L'eau utilisée pour les opérations de coupe contient les éventuels agents de refroidissement et de fines particules de verre. Ces effluents peuvent être traités grâce à des procédés classiques de séparation des matières solides. L'eau peut être réutilisée pour la coupe, afin de minimiser les niveaux d'émission, mais il faudra purger une petite quantité du circuit. Pour l'essentiel, le plomb contenu dans le verre est insoluble.
- Après trempage dans de l'acide, la surface du verre est recouverte d'une couche de sulfate de plomb. Celui-ci est éliminé avec de l'eau chaude qui devient acide et qui contient du sulfate de plomb soluble. Ce déchet peut être traité par un ensemble de techniques chimiques et



physiques. Une réaction peut être déclenchée, avec le sulfate de plomb, pour précipiter le plomb, par exemple avec du carbonate de calcium, qui donne du carbonate de plomb, qui peut ensuite être éliminé, généralement par coagulation et floculation, suivies d'une séparation physique. Grâce à ces techniques, il doit être possible de réduire les taux de plomb à moins de 0,5 mg/l.

- Les déchets acides, provenant des dépoussiéreurs hydrauliques, nécessitent une neutralisation, avant d'être éliminés. Une autre solution consiste à récupérer l'acide hexafluorosilicique, pour le vendre comme produit de départ.

<b><u>Traitement</u></b>	
<b><u>physique/chimique</u></b>	
• Tamisage	• Neutralisation
• Ecumage	• Aération
• Décantation	• Précipitation
• Centrifugation	• Coagulation et floculation
• Filtration	
<b><u>Traitement biologique</u></b>	
• Boues activées	
• Biofiltration	

**Tableau 4.31 : Liste des techniques possibles de traitement des eaux usées, employées dans l'industrie du verre**

#### 4.7 Techniques de réduction d'autres déchets

Une des caractéristiques de l'industrie verrière est que la plupart des activités génèrent relativement peu de déchets solides. Dans leur majorité, les procédés ne provoquent pas des quantités significatives de sous-produits. Les résidus industriels sont des matières premières non utilisées et du verre de rebut, qui n'a pas été transformé en produit fini. Les principaux résidus, rencontrés dans la verrerie, et les techniques utilisées, pour les réduire, sont développés ci-dessous.

##### Rebuts de matières premières

Ils sont dus à la manutention et au stockage des matières et, si les normes de qualité le permettent, peuvent être recyclés dans le circuit de fabrication. En cas d'accumulation de matière, la pureté n'est peut-être pas suffisante, pour un recyclage, mais on peut limiter le nombre de ces incidents, grâce aux techniques décrites au Paragraphe 4.3.

##### Poussières captées dans les effluents gazeux

Dans la plupart des cas, ce produit peut être recyclé dans le circuit de fabrication. Lorsqu'on utilise des absorbants de gaz acide, il suffit de les choisir compatibles avec les matières premières, pour permettre le recyclage, à condition d'ajuster la formule de la composition. Cette question est développée au Paragraphe 4.4.1.

Dans les fours régénératifs, une quantité substantielle de poussière est déposée dans les régénérateurs, au cours de la campagne de fusion. Pendant les opérations de

réfection/réparation. Cette matière est extraite et envoyée sur un site d'enfouissement contrôlé. Il n'est généralement pas possible de la recycler.

### Fonte non transformée en produit

Cette catégorie de déchets se rencontre surtout après une interruption des opérations de formage, due à un dysfonctionnement ou au changement du produit. La technique la plus répandue et la plus performante consiste à refroidir la fonte dans l'eau, et à la briser en éclats, afin d'utiliser les débris, ainsi obtenus, du calcin, directement comme matière première. On peut trouver un certain nombre d'exemples où ces opérations ne sont pas possibles ou ne sont pas pratiquées.

Dans le procédé de verre float, les interruptions de production surviennent généralement, après le bain de float et le résidu est donc un verre solide, qui peut également être cassé et recyclé sous forme de calcins. De même, dans la production du fil de silionne, l'interruption se produit en principe après le formage des fibres et la matière résiduaire est de la fibre. Ce type de déchet peut également provenir du verre de vidange qui consiste à retirer une quantité de verre fondu du fond du lit de coulée, afin d'éliminer les particules non fondues les plus denses. Si elles ne sont pas éliminées, ces particules peuvent occasionner des problèmes de fibrage, pouvant aboutir à des dommages coûteux, et à une augmentation des résidus. Le recyclage interne de cette matière n'est pas recommandé, car il implique le retour des impuretés, dans le four puis leur reflux dans les filières. Ce procédé pourrait provoquer une accumulation progressive de matières non fondues, avec un plus grand risque de déchet dû à des problèmes de fibrage. Dans certains cas, il est possible de recycler cette matière dans d'autres secteurs de l'industrie du verre.

Pour la fibre céramique, il y avait jusqu'à présent peu d'intérêt financier à recycler les résidus fondus. Mais cette pratique se développe en raison de l'augmentation des coûts d'élimination des déchets.

Dans la production de laine de roche, les matières fines ne peuvent pas être recyclées, dans le cubilot, car elles interrompraient le débit d'air à l'intérieur du lit de matières. On peut pallier le problème grâce au briquetage des rebuts, permettant de constituer des pièces de dimensions comparables aux matières premières standard. Cette technique est aujourd'hui très répandue et il semble qu'elle ait fait ses preuves, tant sur le plan économique que technique, même si de grands écarts peuvent exister pour ce qui est des aspects économiques. Les perles de laine de roche, voir Section 3.8.4, peuvent également être recyclées de cette manière.

### Rebuts de fabrication

Cette catégorie inclut les articles non conformes, les égalisation des arêtes, les rebuts de changement de série, les bris et les échantillons prélevés pour les contrôles de qualité. Dans la mesure du possible, il est préférable de mettre en place des mesures pour minimiser ce type de rebuts plutôt que de recycler, par exemple les égalisations des arêtes peuvent être réduites à une largeur minimale. Ces mesures s'accompagnent souvent d'économies.

Les rebuts de verre "dur", par exemple les rognures de verre plat et les calcin d'emballage, sont facilement recyclés, sous forme de calcins, après avoir été pilés. Certaines installations ne pratiquent pas ce recyclage, en raison de différences de formulation, ou simplement parce qu'elles ne l'estiment pas assez économique. En théorie, tous les calcins "durs" peuvent être recyclés de cette manière.

Dans le secteur de la laine minérale, ces rebuts sont fibreux et ne peuvent donc pas être recyclés directement dans le four. La solution est de broyer le matériau, puis de le recycler, sous forme de poudre, dans les fours à bassin, ou par l'opération de briquetage, pour les cubilots de laine de roche. Apparemment simple dans son principe, cette technique est assez coûteuse, et ce n'est que récemment qu'elle devient viable économiquement, en raison de l'augmentation des coûts

d'élimination des déchets. Au moment de la rédaction de ce document, cette technique n'est pas couramment adoptée. Un autre problème, avec la fabrication de la laine de verre, est la teneur en substances organiques, qui doivent être oxydées dans le four. Cette opération nécessite généralement une plus grosse consommation de nitrates qui se décomposent, pour former des NOx. Dans la mesure du possible, les déchets fibreux sont traités et vendus comme flocons de fibre. Les déchets de rognures sont en général broyés et recyclés directement dans le couverture de fibre. La quantité de déchets recyclés de cette manière, égalisation des arêtes uniquement, est limitée et ce recyclage n'est pas effectué pour les produits pour lesquels une norme minimale de résistance est spécifiée.

Les déchets fibreux provenant du secteur de la fibre céramique posent les mêmes problèmes que pour la laine minérale. Au moment de la rédaction de ce document, on ne connaissait aucun exemple de recyclage des déchets fibreux, bien qu'en principe il soit possible. Les rebuts peuvent être broyés, pour former une poudre, puis chauffés si nécessaire, pour brûler d'éventuelles substances organiques. Les conséquences écologiques et économiques de cette méthode n'en font pas un choix intéressant. Les travaux de recherche se poursuivent dans ce domaine.

La production du fil de silionne implique des normes de qualité extrêmement élevées et, au moment de la rédaction de ce document, il n'existe aucun exemple à échelle industrielle, de recyclage de déchets fibreux dans le four. Il semble que le problème vienne des composants organiques de la fibre.

#### **Déchets solides provenant des réseaux d'eaux usées**

En général, les déchets séparés des circuits d'eau de procédé, ne sont pas recyclés et sont éliminés dans des sites d'enfouissement. Dans certains secteurs, notamment la gobeletterie, boues de découpe du cristal au plomb, des programmes sont mis en œuvre pour récupérer et valoriser ces catégories de déchets. Dans la plupart des secteurs, il n'est pas viable financièrement de récupérer ces rebuts, en raison de leur faible volume, de leur composition inconnue ou de leur contamination.

Le recyclage des déchets après consommation, dans les dépôts de bouteilles par exemple, n'est pas examiné dans ce paragraphe, car il ne s'agit pas d'un déchet de fabrication et n'entre donc pas dans le cadre de la Directive PCIP. Toutefois, son utilisation ayant d'importantes conséquences sur le procédé, il est traité aux Sections 4.4 et 4.8. Par ailleurs, cette pratique permet de réduire la consommation de matières premières vierges, ce qui est un aspect positif pour la directive PCIP.

### **4.8 Energie**

La fabrication du verre est une opération gourmande en énergie et le choix de la source, de la technique de chauffage et de la méthode de récupération de chaleur, est essentiel pour le modèle de four et la performance économique du procédé. Ces mêmes choix représentent également les facteurs les plus importants, quant à la performance écologique, et l'efficacité énergétique de l'opération de fusion. D'une manière générale, l'énergie nécessaire pour la fusion représente plus de 75 % des besoins totaux en énergie de la fabrication du verre. Ce paragraphe s'arrête sur les techniques permettant de réduire les besoins énergétiques des activités de fusion.

Le coût de l'énergie nécessaire à la fusion est l'un des postes les plus importants des coûts d'exploitation et les industriels sont vivement encouragés à réduire la consommation d'énergie. Les aspects financiers ont toujours été un motif de mise en place de techniques d'économie d'énergie mais, plus récemment, les aspects écologiques, liés à la consommation d'énergie ont pris une plus grande importance. Dans les fours à combustible fossile, la consommation d'énergie affecte également les émissions par tonne de verre, des substances directement liées à

la quantité de combustible fossile brûlé, en particulier le CO<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> et les Nox, mais également les matières particulaires. Ces questions sont développées dans les sections de ce chapitre correspondant à chaque substance.

La consommation d'énergie et les principaux facteurs, influant sur le rendement énergétique, sont traités dans le Chapitre 3. Ce chapitre présente les techniques permettant d'améliorer le rendement du four.

### 4.8.1 Technique de fusion et conception du four

[tm18 COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE. tm5 EEO. tm14 ETSU]

Le choix de la méthode de fusion peut avoir une grande répercussion sur le rendement énergétique. Ce choix est en grande partie déterminé par un ensemble de considérations économiques. Le facteur essentiel est le taux de production programmé, et les coûts d'investissement et d'exploitation qui s'y rattachent, sur la durée de vie du four. Un des aspects importants des coûts d'exploitation est la consommation d'énergie et, en règle générale, l'industriel choisira le modèle ayant le meilleur rendement énergétique possible.

Dans les fours traditionnels, à combustible fossile, la principale différence de conception se situe au niveau du système de récupération de chaleur, qui est équipé soit de régénérateurs soit d'un récupérateur. Les différences de conception et d'exploitation sont présentées au Chapitre 2. Un des principaux éléments de choix est la dimension du four, qui est présentée au Paragraphe 4.2.

Les fours régénératifs atteignent une plus grande température de préchauffage des gaz de combustion, jusqu'à 1400°C, par rapport à 800°C, pour les fours à récupération. Ce qui permet de bien meilleures performances de fusion. La dimension généralement plus grande des fours régénératifs fait qu'ils ont un meilleur rendement énergétique, que les fours à récupération, plus petits. Cela s'explique par le fait que les pertes structurelles sont inversement proportionnelles à la dimension du four, la principale raison étant la modification du rapport surface/volume. Un four régénératif moderne, présente une efficacité thermique globale de l'ordre de 50 %, avec une perte des gaz brûlés d'environ 20 %, les pertes structurelles constituant la grande majorité du pourcentage restant. Le rendement thermique d'un four à récupération, sans récupération de chaleur, est proche de 20 %.

Les fours régénératifs sont des fours à boucle ou à brûleurs latéraux. Les fours à boucle ont une plus grande efficacité thermique, jusqu'à 10 % de plus. Mais le réglage de la combustion est plus limité, ainsi que la dimension du four, actuellement environ 150 m<sup>2</sup>, pour le verre d'emballage. Les fours, pour verre float, sont moins performants que les fours pour verre d'emballage, car la production spécifique des premiers est bien inférieure, en raison des exigences de qualité.

L'énergie récupérée, par les régénérateurs, peut être maximisée en augmentant la quantité de briques réfractaires utilisées. En pratique, celles-ci peuvent être organisées dans des chambres de régénération de plus grande dimension, ou dans des structures séparées mais reliées, d'où le nom de régénérateurs, à plusieurs passages. La loi du rendement décroissant s'applique, car l'efficacité du régénérateur approche de sa valeur limite d'émission maximale de manière asymptotique. Les principales limitations sont le coût du supplément de briques réfractaires et, dans le cas des fours existants, le manque d'espace disponible et le surcoût d'une modification des infrastructures du four. Ce principe s'applique plus couramment aux fours à boucle, en raison de la simplicité de leur géométrie de régénération, bien que certaines applications, sur les fours à brûleurs transversaux, aient été faites. La modification des structures d'un régénérateur, sur les fours existants, si elle s'avère possible d'un point de vue technique et économique, selon l'implantation de la verrerie, ne peut être effectuée que lors de la réfection du four. On peut enregistrer une diminution de la consommation d'énergie, pouvant atteindre 15 %, par rapport à un four équivalent, équipé de régénérateurs classiques à un seul passage.

Le seul inconvénient est la quantité supplémentaire de matériaux réfractaires qu'il faut gérer en fin de vie du four. Cet effet négatif est limité, car une portion non négligeable des briques réfractaires supplémentaires, peuvent supporter deux campagnes de fusion ou plus et, pour recycler ces matériaux. Il existe actuellement des solutions et d'autres continuent à être mises au point. Bien que l'augmentation des températures de préchauffage de l'air, dans les fours équipés de régénérateurs à plusieurs passages, constitue un risque d'augmenter la température de la flamme et donc la formation de Nox, ces fours n'entraînent pas, en pratique, des taux élevés de Nox, lorsque des mesures appropriées de réduction à la source ont été mises en œuvre.

Toutes sortes de matériaux peuvent être utilisés pour le stockage thermique et l'empilage dans les régénérateurs. La solution la plus simple est d'empiler des briques réfractaires, en "tressage de panier", en formant un quadrillage, ce qui confère généralement au régénérateur un rendement d'environ 50 %, chaleur récupérée par l'air, par rapport à la chaleur contenue dans les gaz brûlés. On peut toutefois améliorer le transfert de chaleur, en utilisant un empilage de forme spéciale et des matériaux coulés par fusion. Par exemple des croisillons gaufrés, coulés par fusion permettent d'améliorer le rendement de l'échange de chaleur, par rapport à un empilage classique de briques, et on a signalé des économies moyennes de combustible de l'ordre de 7 %. En outre, ces matériaux sont très résistants aux attaques chimiques des substances volatiles, contenues dans le courant gazeux, et leur performance s'est beaucoup moins dégradée, tout au long de la campagne, par rapport aux briques. A ce jour, on compte environ 320 installations, équipées de croisillons gaufrés, dans le monde, dont 120 dans l'Union européenne.

Le rendement théorique maximum d'un régénérateur est de 80 %, car la masse des déchets gazeux du four, dépasse celle de l'air de combustion entrant, et la capacité calorifique des déchets gazeux dépasse celle de l'air de combustion. En d'autres termes, le rendement est limité par le coût, et les pertes structurelles augmentent, à mesure que la taille du régénérateur augmente. Il est difficile de concevoir un modèle de régénérateur d'un bon rapport coût-efficacité, avec un rendement supérieur de 70 à 75 %.

La géométrie des fours est constamment perfectionnée, afin d'optimiser les courants thermiques et le transfert de chaleur, tant pour améliorer la qualité du verre, que pour économiser de l'énergie. Leur mise au point est souvent associée à la mise au point des systèmes de combustion, permettant de réduire les émissions et d'économiser l'énergie. Les modifications de géométrie ne sont possibles que pour les fours neufs, ou ceux qui ont fait l'objet d'une réfection.

La fusion électrique, partielle ou totale, améliore le rendement énergétique, si on se place du point de vue de l'installation, mais si on considère la production d'énergie et les pertes de réseau, la situation est moins claire. Ces techniques sont décrites de manière plus détaillée au Paragraphe 4.2. La fusion à l'oxygène peut également donner lieu à une réduction de la consommation d'énergie, mais il s'agit d'un sujet complexe qui est traité plus en détail au Paragraphe 4.4.2.5.

Les progrès réalisés dans les matériaux réfractaires, au cours de ces dernières décennies, ont permis d'exploiter les fours sur des campagnes plus longues et avec une bien meilleure isolation. La valeur limite d'émission de température à laquelle la superstructure du four pouvait être soumise était par le passé un facteur limitant pour une bonne isolation. Aujourd'hui, l'isolation doit être pensée avec soin, en fonction de la partie du four concernée, et des conditions d'exploitation, température, type de verre, etc. On ne peut pas isoler toutes les parties du four. La ligne de flottaison et la gorge ne doivent pas être isolées, mais doivent être refroidies, pour prolonger la vie du four. La plupart des réfractaires constituant la superstructure et ceux en contact avec le verre, sont des matériaux coulés par fusion qui sont très denses, ont une faible porosité et peuvent résister au verre liquide et aux composés volatiles, dans la superstructure. Leur conductivité thermique est élevée et il est nécessaire en général de les équiper d'une bonne isolation, pour réaliser des économies d'énergie substantielles. Pour le verre sodocalcique, la voûte est en silice avec une solide isolation. Cette matière permet de limiter la température du

four à 1600 - 1620°C. Toute augmentation de la température peut également provoquer une augmentation des émissions de NOx et d'éventuelles émissions liées aux composés volatils de la charge.

Une isolation supplémentaire peut être mise en place, sur certaines zones du four, avec peu de risques de détérioration structurelle. L'isolation par projection de fibre permet de réduire sensiblement les pertes de chaleur, lorsqu'elle est appliquée à la structure du régénérateur. Cette technique efficace, économique et simple, permet de réduire les pertes de chaleur structurelles du régénérateur jusqu'à 50 % et de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de 5 %. Un autre avantage est que ce matériau permet de boucher efficacement certaines fissures, sur la structure du régénérateur, en réduisant ainsi la pénétration d'air froid et la fuite d'air chaud.

### 4.8.2 Régulation de la combustion et choix du combustible

[tm5 EEO. tm14 ETSU]

Ces dernières décennies, le combustible le plus répandu, pour la fabrication du verre est le fioul. Mais le gaz naturel est de plus en plus apprécié. La combustion du gaz naturel entraîne des émissions de Sox, mais donne lieu en général à des émissions de NOx encore plus élevées. En effet, la flamme du gaz naturel est moins radiante et la consommation d'énergie est donc plus élevée, d'environ 7 à 8 %. Mais avec les progrès des connaissances sur le chauffage au gaz, les niveaux de performance se rapprochent progressivement de ceux associés au chauffage au fioul. Le gaz naturel présente un rapport hydrogène/carbone plus élevé et son utilisation permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> jusqu'à 25 %, pour un taux de production donné.

Les dernières innovations, dans le domaine des brûleurs à faible émission de Nox, ont également permis des économies d'énergie. En réduisant la quantité d'air de combustion, au plus près des taux stœchiométriques, la perte d'énergie, dans les gaz brûlés est réduite. Les améliorations apportées au système de combustion, aux circuits de transfert de chaleur et à la maîtrise générale des procédés, au cours des études destinées à réduire les émissions de Nox, ont abouti dans de nombreux cas à des améliorations du fonctionnement et de l'efficacité des fours.

Une technique, fréquemment utilisée dans le passé, pour améliorer le rendement énergétique et le taux de production, consistait à enrichir l'air de combustion d'oxygène. La diminution des volumes de gaz et l'augmentation de la température de la flamme, permettent d'améliorer le rendement énergétique, mais à moins d'inclure la technique dans un système de combustion soigneusement contrôlé pour réduire les émissions de Nox, on peut observer une augmentation sensible des taux de NOx. L'emploi de cette technique dans le procédé d'isolation est de moins en moins répandu, en raison de ces problèmes d'environnement.

### 4.8.3 Utilisation du calcin

[tm29 Infomil. tm14 ETSU]

L'utilisation de calcin dans un four de verrerie permet de réduire sensiblement la consommation d'énergie et elle peut généralement s'appliquer à tous les types de fours, à combustible fossile, oxycombustion et électriques. La plupart des secteurs de l'industrie du verre recyclent systématiquement le calcin interne. Les principales exceptions sont la production de fil de silionne, où le recyclage n'est pas jugé possible, en raison des exigences de qualité, de laine de roche et de fritte, où il n'y a pas de production de calcin en tant que tel. Le pourcentage moyen de calcin interne dans la composition, se situe en principe entre 10 et 25 %.

Le calcin nécessite une énergie de fusion moins importante que les matières premières constitutives, car les réactions chimiques endothermiques, liées au formage du verre, sont terminées et sa masse est de 20 % inférieure, à celle des matériaux de composition équivalents. Ainsi, une hausse du taux de calcin, dans la composition, est un moyen d'économiser de



l'énergie, en règle générale, chaque ajout de 10 % de calcin supplémentaire, entraîne une réduction de 2,5 à 3,0 %, de la consommation d'énergie du four. L'utilisation de calcin se traduit en général par une importante économie financière, résultant d'une diminution de l'énergie et de la quantité de matières premières nécessaires.

Il faut distinguer le calcin interne, verre recyclé issu de la chaîne de fabrication, du calcin externe, verre recyclé issu de la consommation ou de sources industrielles extérieures. La composition du calcin externe est moins bien définie, ce qui limite son application. Les exigences de qualité du produit fini peuvent limiter la quantité de calcin externe, utilisé par le fabricant. Le secteur du verre d'emballage est toutefois exceptionnellement bien placé pour tirer profit des grosses quantités de calcin étranger, provenant du recyclage des bouteilles. Au moment de la rédaction de ce document, hormis les secteurs où des programmes spéciaux sont mis en place, l'utilisation intensive de calcin externe est réservée au secteur du verre d'emballage et à certains domaines du secteur de la laine minérale. Les secteurs de la verrerie où les normes de qualité sont plus élevées, ou qui ne peuvent pas se procurer aussi facilement du calcin externe, par exemple verre plat, peuvent essayer de passer des marchés avec les grosses industries consommatrices, pour recycler les calcins qu'ils génèrent.

L'utilisation de calcin dans la fabrication du verre d'emballage varie de moins de 20 % à plus de 90 %, avec une moyenne de l'ordre de 48 %, pour l'Union européenne. Les taux de recyclage varient énormément, parmi les Etats membres, en fonction des méthodes adoptées, pour collecter le verre après consommation. Les verres d'emballage haut de gamme ont un taux de calcin inférieur à celui des produits standard.

Dans le secteur de la gobeletterie, le facteur qualité dissuade d'utiliser du calcin externe, dans le procédé. L'emploi du calcin interne est limité par la disponibilité de calcin de qualité et de composition satisfaisantes. Les quantités moyennes, de calcin interne, utilisé sont de 25 %, pour les produits sodocalciques, et de 35 % pour le cristal au plomb.

Pour la fabrication du flint, verre blanc, on ne peut tolérer qu'un très faible taux de calcin coloré, car le verre coloré ne peut pas être décoloré. Les programmes de recyclage sont donc plus efficaces, lorsqu'ils permettent de séparer les couleurs. Le calcin vert et marron est présent en abondance, dans toute la Communauté, mais le calcin de flint tend à être moins répandu et, du fait de cette situation, les fours qui fondent du verre coloré fonctionnent avec des taux plus élevés de calcin. La situation varie considérablement d'un Etat membre à l'autre, en raison de différences régionales. Il y a par exemple un problème au Royaume-Uni, car le gros de la production est du verre flint, alors qu'une grosse proportion de calcin est colorée, car il provient des bouteilles de vin importées. Les pourcentages de calcin sont donc en moyenne plus faibles au Royaume-Uni.

En termes d'exploitation du four, les taux élevés de calcin peuvent apporter d'autres avantages comme la baisse des émissions de particules. Le calcin est plus facile à préchauffer que la composition. La production du four peut également être sensiblement augmentée. Mais on observe un certain nombre d'inconvénients, avec des taux élevés de calcin.

- Les impuretés métalliques, provenant des capsules et des stanioles de bouteilles de vin, peuvent gravement endommager les matériaux réfractaires, et raccourcir la vie du four. Les éléments métalliques coulent, dans le fond où se produit un phénomène appelé "érosion descendante". Par réaction chimique, les éléments métalliques percent des trous, dans le fond du four.
- Des inclusions de céramique, comme la terre cuite ou le grès, qui sont insolubles dans le verre fondu, se retrouvent sous forme de "pierres", dans le produit fini qui sera rejeté.
- Avec des taux élevés de calcin, il est plus difficile de contrôler la composition et donc les caractéristiques physiques du verre fondu, entraînant éventuellement des problèmes de qualité pour le produit fini. La teneur variable, en matières organiques, résidus alimentaires,

étiquettes, morceaux de plastique, peut notamment causer des problèmes de rédox, conduisant à des difficultés de coloration et d'affinage.

- Les capsules et stannoles en aluminium ont une forte action réductrice, provoquant la réduction du silice du verre en métal de silicone. Le silicone forme de petites billes qui réduisent considérablement la résistance mécanique du verre, en raison des contraintes résultant de la grande différence de coefficient de dilatation thermique, entre le verre et le silicone.

Outre les économies d'énergie substantielles, qui sont possibles avec l'emploi de calcin, on peut observer un certain nombre d'autres avantages pour l'environnement. Les émissions de CO<sub>2</sub>, de SO<sub>x</sub>, de NO<sub>x</sub> et de poussières sont sensiblement réduites du fait de la baisse de consommation de fioul et des températures plus basses dans le four. Les émissions d'autres substances volatiles peuvent également être réduites, en raison de la baisse de température. Toutefois, les impuretés que contient le calcin peuvent être à l'origine d'émissions plus importantes de HCl, de HF et de métaux. On observe cette situation en particulier dans les secteurs où les pourcentages de recyclage sont importants, car les impuretés peuvent s'accumuler, dans le matériau recyclé. De nombreuses matières premières, destinées à la fabrication du verre, sont des carbonates et des sulfates, qui dégagent du CO<sub>2</sub> et des SO<sub>x</sub> à la fusion. L'utilisation, plus fréquente du calcin, permet de réduire les émissions, dérivées de ces matières premières, et de limiter la consommation de matières premières vierges.

### 4.8.4 Chaudière de récupération

Le principe de cette technique est d'envoyer les gaz brûlés directement dans une chaudière à tubes, pour produire de la vapeur. Cette vapeur peut être utilisée pour chauffer, un local ou l'enceinte de stockage du fioul avec ses canalisations, ou avec un moteur ou une turbine, pour entraîner des équipements de production électrique, ou des unités industrielles, telles que compresseurs à air, ventilateurs de machine sectionnelle.

Les gaz sortant des régénérateurs/récupérateurs ont généralement une température comprise entre 600°C et 300°C. La température de sortie détermine la chaleur récupérable, disponible qui est limitée à environ 200°C, en raison du risque de condensation dans la chaudière, et pour assurer le bon fonctionnement de la cheminée. Les tubes de la chaudière, en contact avec les déchets gazeux du four, peuvent se recouvrir de condensats, sulfate de sodium par exemple, en fonction de la composition, et doivent être nettoyés régulièrement, pour conserver une bonne efficacité de récupération, ce problème est moins important pour les chaudières installées en aval des dispositifs de dépoussiérage. Le nettoyage sur place peut être effectué automatiquement par la vapeur, des moyens mécaniques ou une maintenance périodique.

L'applicabilité et la faisabilité économique de la technique sont dictées par l'efficacité globale qu'il est possible d'obtenir, y compris l'utilisation réelle de la vapeur produite. En pratique, les chaudières de récupération n'ont été envisagées que pour récupérer la chaleur résiduelle, en aval des systèmes régénérateur/récupérateur, et on pense qu'il en existe au moins deux exemples avec des fours oxycombustion. Dans de nombreux cas, la quantité d'énergie récupérable est faible, pour une production électrique rentable, et ne constitue qu'une possibilité, pour les fours à récupération, pour de grosses installations ou lorsqu'il est possible de regrouper les déchets gazeux de plusieurs fours. Les chaudières de récupération sont utilisées dans certaines usines de fabrication de verre d'emballage. Mais la plupart des applications concernent des fours pour verre float. Tous les fours pour verre float en Allemagne sont équipés de chaudières de récupération.

Les coûts d'investissement peuvent dépasser 1 million d'euros, avec des périodes de récupération variables selon la performance et le prix de l'énergie utilisée. Avec l'amélioration

permanente du rendement de l'énergie primaire, le rapport coût-efficacité, des chaudières de récupération, est de plus en plus restreint. Dans certaines applications, la période de retour d'investissement n'est pas toujours intéressante, mais elle varie d'un cas à un autre. Le procédé 3R peut contribuer à rendre plus efficaces les chaudières de récupération existantes et devrait probablement améliorer la performance économique de tout nouveau système à installer. Toutefois, si pour une raison quelconque l'installation d'une chaudière de récupération n'est pas jugée utile ou économiquement intéressante, la mise en place du procédé 3R ne modifiera pas forcément la situation.

#### 4.8.5 Préchauffage de la composition et du calcin

[tm29 Infomil]

##### Description de la technique

La composition et le calcin sont normalement introduits froids, dans le four, mais en utilisant la chaleur résiduelle des gaz brûlés, pour les préchauffer, d'importantes économies d'énergie sont possibles. Cela ne s'applique qu'aux fours à combustible fossile. Dans l'industrie de la laine de roche, on utilise surtout des fours à cubilot, dont la conception permet un préchauffage intrinsèque des matières premières.

Des préchauffeurs de composition/calcin ont été mis au point et installés par GEA/Interprojekt, préchauffage direct, Zippe, préchauffage indirect et Sorg, préchauffage direct. Récemment, Edmeston a mis au point et installé un ensemble mixte de préchauffage direct du calcin et de précipitation électrostatique. Les trois systèmes disponibles sont décrits ci-dessous.

##### Préchauffage direct

Ce type de préchauffage fonctionne par contact direct entre le gaz de fumée et la matière première, calcin et composition, dans un flux à contre-courant. Les gaz brûlés sont amenés dans le préchauffeur, par le conduit situé derrière le régénérateur. Ils traversent les cavités du préchauffeur et viennent donc en contact direct avec la matière première. La température de sortie du calcin atteint 400°C. Le dispositif est équipé d'une dérivation qui permet de poursuivre l'exploitation du four, lorsque l'utilisation du préchauffeur est inappropriée ou impossible. Les préchauffeurs directs sont mis au point et installés par Interprojekt, anciennement par GEA, et par Sorg.

##### Préchauffage indirect

Le préchauffeur indirect est en principe un échangeur thermique à plaque à contre-courant, dans lequel la matière est chauffée indirectement. Il s'agit d'une construction modulaire constituée de plusieurs blocs d'échange thermique, installés les uns au-dessus des autres. Ces blocs sont eux-mêmes divisés en entonnoirs horizontaux, pour les déchets gazeux, et verticaux pour les matières. Dans l'entonnoir de matières, celles-ci circulent de haut en bas par gravité. En fonction de la puissance, la matière atteint une vitesse de 1 à 3 m/h et elle est normalement chauffée de la température ambiante à environ 300°C. Les gaz de fumée sont laissés au fond du préchauffeur et montent dans la partie supérieure au moyen d'entonnoirs spéciaux de dérivation. Les effluents gazeux circulent horizontalement, à travers chaque module. En moyenne, les gaz de fumée sont refroidis d'environ 270°C à 300°C. Le préchauffeur indirect de calcin a été mis au point par Zippe.

##### Filtre EGB d'Edmeston

Le filtre à lit de granulé électrifié, Electrified Granulate Bed - EGB, d'Edmeston, est un système hybride, entre le précipitateur électrostatique pour le dépoussiérage, et un préchauffeur direct de calcin. Les déchets gazeux chauds pénètrent, par le haut du système, et traversent un étage

ionisant, qui donne une charge électrique aux particules de poussière. Le gaz passe ensuite dans un lit de calcin en granulé polarisé, par une électrode haute tension. Les particules de poussière chargées sont attirées par le calcin, dans lequel elles se déposent. Le calcin se trouve dans une cuve. Il est ajouté en continu par le haut et retiré par le bas. Le calcin préchauffé, jusqu'à 400°C, avec les particules qui y sont collées sont chargés dans le four.

### Performances environnementales

Ces techniques ont de nombreux effets sur l'environnement, qui varient selon les cas. En général, les avantages suivants ont été observés.

- Economies d'énergie entre 10 et 20 %.
- Réduction des émissions de NOx, baisse de la consommation de combustible et des températures dans le four.
- Dans le cas du préchauffage direct, on a observé une réduction des composés acides de 60% pour le SO<sub>2</sub>, 50% pour le HF et 90% pour le HCl, différence avant et après le lit de calcin.

### Aspects financiers

Les aspects économiques, des préchauffeurs de composition/calcin, dépendent en grande partie de la capacité du four et du préchauffeur. A titre indicatif, donnons un exemple de coûts pour un préchauffeur indirect équipant un four de verre d'emballage de 370 tonnes/jour, ayant entraîné un coût total d'investissement, y compris le précipitateur électrostatique, de 2,5 millions d'euros, dont 0,8 millions pour le seul préchauffeur. Si des économies d'énergie importantes peuvent être réalisées, la période de retour d'investissement peut atteindre entre 3 et 10 dix. Elle peut être inférieure lorsqu'il est possible de limiter le boosting électrique. Au moment de la rédaction de ce document, la majorité des fabricants européens de verre d'emballage estiment que le préchauffage du calcin ne présente pas d'intérêt économique. Mais cette position peut varier d'une région à l'autre et est constamment remise en question, avec la modification des prix de l'énergie et d'autres facteurs, valeur limite d'émission d'émission, etc.

### Applicabilité

Les systèmes de préchauffage composition/calcin peuvent théoriquement être installés sur n'importe quel fondoir à verre, avec plus de 50 % de calcin dans la composition. Le préchauffage de la composition seule est problématique, et n'est pas considéré comme une technologie prouvée. L'utilisation d'un préchauffeur direct entraîne une augmentation des émissions de particules, jusqu'à 2 000 mg/Nm<sup>3</sup>, et il est nécessaire de prévoir des mesures secondaires de réduction des particules. Les poussières recueillies peuvent normalement être recyclées dans le four.

Pour que la perte de chaleur du dispositif de transport, situé en dessous du préchauffeur, soit aussi faible que possible, le préchauffeur doit être installé, aussi près que possible du laboratoire. Il devrait de préférence être situé directement au-dessus de l'enfourneuse. Pour des raisons économiques, la température du gaz résiduaire disponible, doit être d'au moins 400 à 450°C. En outre, il faut prévoir le refroidissement des gaz de fumée, d'au moins 200 à 250°C. Pour empêcher l'agglomération de matières, la température maximale d'entrée des gaz de fumée ne doit pas dépasser 600°C.

### Autres aspects annexes

Cette technique peut contribuer à augmenter la capacité du four de 10 % à 15 %, sans altérer la durée de vie de celui-ci. Si la production de la filière n'est pas augmentée, la durée de vie du four peut se trouver légèrement allongée. En apportant plus de chaleur dans le four, la technique peut également réduire les besoins de boosting électrique.

Dans certains cas, on a observé des problèmes d'odeurs, émanant du préchauffeur, dues à des vapeurs organiques, dégagées pendant le séchage préliminaire du calcin. Les problèmes sont dus

aux particules alimentaires et d'autres substances organiques, qui brûlent dans le calcin externe. Des solutions, incinération par exemple, sont en cours d'étude.

Le préchauffage des matières consomme de l'énergie électrique, en particulier le préchauffage direct, pour lequel il faut installer un précipitateur électrostatique. Une partie des économies d'énergie s'en trouve annulée, mais ce n'est pas considérable.

Il y a un risque que le préchauffage direct entraîne des émissions de dioxine, en particulier s'il s'y ajoute des effluents gazeux, issus de la partie chaude du revêtement et contenant du HCl.

### **Exemples d'installations**

(toutes pour verre d'emballage)

Préchauffage direct :

Quatre fours à Nienburger Glas, Nienburg, Allemagne.  
Gerresheimer Glas, Dusseldorf, Allemagne.  
Wiegand Glas, Stein am Wald, Allemagne.  
Gerresheimer Glas, Budenheim, Allemagne.

Préchauffage indirect :

PLM Glasindustrie Dongen BV, Dongen, Pays-Bas.  
PLM Glass Division, Bad Münden, Allemagne.  
Vetropack, St. Prex, Suisse – n'est plus en service.

Filtre EGB d'Edmeston :

Irish Glass, Dublin, Irlande.  
Leone Industries, New Jersey, USA , four oxycombustion.

## 5 CONCLUSIONS SUR LA QUESTION DES MTD

### 5.1 Introduction

Pour comprendre ce chapitre et son contenu, le lecteur devra se conformer à la préface, de ce document, et notamment à la cinquième partie : “Comment comprendre et utiliser ce document”. Les techniques et niveaux d’émission et/ou de consommation, présentés dans ce chapitre ont été évalués par un procédé itératif, impliquant les étapes suivantes :

- Identification des principaux problèmes environnementaux, pour le secteur, dans ce cas les les émissions atmosphériques provenant des fours.
- Examen des techniques les plus appropriées pour traiter ces questions essentielles.
- Identification des meilleurs niveaux de performance environnementale, sur la base des données disponibles, dans l'Union européenne et dans le monde.
- Examen des conditions, dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints, coûts, actions croisées sur les autres milieux, principaux facteurs intervenant dans la mise en place de ces techniques.
- Sélection des meilleures techniques disponibles, MTD, et des niveaux d’émission et/ou de consommation, qui y sont associés, pour ce secteur en règle générale, conformément à l'Article 2(11) et à l'Annexe IV de la Directive.

L'expertise du Bureau européen PCIP et du Groupe de Travail Technique, GTT, a joué un rôle fondamental dans chacune de ces étapes et dans la manière de présenter les informations, dans ce document.

Sur la base de cette étude, les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d’émission et de consommation, associés à l'utilisation des MTD, sont présentés, dans ce chapitre, s'ils sont jugés appropriés pour l'ensemble du secteur et, dans de nombreux cas, témoignent de la performance actuelle de certaines installations de l'industrie. Lorsque les niveaux d’émission ou de consommation “associés aux meilleures techniques disponibles” sont mentionnés, il est sous-entendu que ces niveaux représentent les performances prévisibles, résultant de l'application des techniques décrites, dans le secteur concerné, en tenant compte d’un bon équilibre entre les coûts et les avantages inhérents à la définition même de la MTD. Il ne s'agit cependant pas de valeurs limites d’émission ou de consommation, et ils ne doivent pas être compris ainsi. Dans certains cas, il peut être techniquement possible d'obtenir de meilleurs niveaux d’émission ou de consommation, mais en raison des dépenses encourues ou des risques de pollution croisée d’autres milieux, ils ne sont pas jugés appropriés comme MTD, pour l’ensemble du secteur. Ces taux peuvent toutefois être considérés comme justifiés, dans des cas plus spécifiques où on observe la présence de facteurs particuliers.

Les niveaux d’émission et de consommation, associés à l'adoption des MTD, doivent être considérés conjointement, avec toutes conditions de référence spécifiées, périodes de moyenne, etc.

Le concept de “niveaux associés aux MTD”, décrit ci-dessus, doit être distingué de l'expression “niveau réalisable”, utilisée dans d'autres parties de ce document. Lorsqu'un niveau est dit “réalisable”, avec une technique particulière, ou un ensemble de techniques, cela signifie qu'on peut envisager d'atteindre ce niveau, pendant une période substantielle, dans une installation bien entretenue et bien exploitée, où ces techniques sont mises en œuvre.

Lorsqu'elles sont disponibles, des données concernant les coûts ont été mentionnées, avec la description des techniques présentées dans le chapitre précédent. Elles donnent une indication de l'importance des coûts considérés. Toutefois, le coût réel d'application d'une technique, dépend énormément de la situation particulière, en ce qui concerne, par exemple, les taxes, les droits et les caractéristiques techniques de l'installation concernée. Il n'est pas possible dans ce document, d'évaluer dans leur intégralité les facteurs spécifiques à un site. En l'absence de



données concernant les coûts, les conclusions, sur la viabilité économique des techniques, sont tirées à partir des observations, réalisées sur les installations existantes.

Les MTD générales sont présentées, dans ce chapitre, à titre de références par rapport auxquelles pourront être jugés la performance d'une installation existante ou un projet de nouvelle installation. De cette manière, elles contribueront à déterminer les conditions appropriées "basées sur les MTD", pour l'installation ou pour l'établissement de règles générales, applicables au titre de l'Article 9(8). On pense que les nouvelles installations pourraient à l'avenir être conçues de façon à atteindre ou dépasser les niveaux moyens présentés ici. Il est également envisagé que les installations existantes pourront se rapprocher ou dépasser les niveaux moyens, sous réserve de l'applicabilité technologique et économique des techniques dans chaque cas.

Bien que les documents de référence ne fixent pas de normes légalement imposables, ils visent à fournir des informations à titre indicatif pour l'industrie, les Etats membres et le public, sur les niveaux d'émission et de consommation qui peuvent être atteints, avec les techniques mentionnées. Les valeurs limites appropriées pour un cas particulier devront être déterminées en tenant compte des objectifs de la Directive PCIP et des paramètres locaux.

Ce chapitre analyse les MTD pour les principales émissions pour chaque secteur de l'industrie du verre, dans les Paragraphes 5.3 à 5.10. Dans la plupart des secteurs, elles sont limitées aux émissions atmosphériques, car elles sont jugées prioritaires pour l'industrie verrière. Dans les paragraphes spécifiques à un secteur, les émissions sont analysées séparément, pour chaque substance, à partir de la fusion et plus généralement ensuite, pour les activités en aval. Les émissions aqueuses sont, dans la plupart des cas, relativement faibles et non spécifiques à la verrerie. Les aspects généraux des émissions aqueuses et d'autres rejets sont présentés dans les paragraphes 5.11 et 5.12.

## 5.2 Généralités

Une caractéristique essentielle de nombreuses installations de l'industrie du verre est la réfection périodique des fours. On distingue deux catégories de réfection, normale et la complète, qui sont décrites au Paragraphe 4.1. Pour un certain nombre des techniques, présentées au Chapitre 4, il peut être intéressant sur le plan technologique et plus rentable de retarder leur mise en place, en attendant une réfection. Pour certaines techniques, la mise en œuvre n'est possible qu'au moment d'une réfection, normale ou complète, et pour d'autres ce report présente peu d'intérêt. Ces questions sont développées au Paragraphe 4.1 et dans les observations spécifiques aux techniques décrites au Chapitre 4.

Un autre facteur important pour décider ce qui est approprié, pour une installation particulière, est l'âge du four. La conduite à adopter pour un four qui devrait continuer de fonctionner pendant encore 8 à 12 ans, peut être très différente de celle pour un four à refaire dans 1 ou 2 ans. Cela peut considérablement influencer sur le choix entre, par exemple, une technique nécessitant un changement majeur de technologie, chauffage oxycombustion, qui ne peut être mis en œuvre que dans le cadre d'une réfection, et une technique secondaire, qui peut être adaptée à l'usine existante.

Pour certains paramètres, et en particulier pour les Nox, dans certains secteurs, le potentiel pour des techniques primaires n'a pas été entièrement développé. Dans la Directive 96/61/CE, la préférence est donnée aux mesures de prévention contre la pollution et, si ces techniques primaires font l'objet d'un développement plus poussé, elles pourraient représenter les MTD de manière plus appropriée que certaines des techniques secondaires analysées dans ce Chapitre. Dans de nombreux cas de l'industrie verrière, la mise en œuvre, de toute la gamme de techniques examinées dans ce chapitre, représente un investissement considérable et les coûts annexes seraient insupportables, à moins d'une mise en œuvre, sur une période raisonnable.

Sauf indications contraires, les conditions de référence, des chiffres présentés dans ce chapitre sont les suivantes :

- Pour les gaz de combustion : sec, température 0°C, 273K, pression 101,3 kPa, 8 % d'oxygène en volume, fusion continue, 13 % d'oxygène en volume, fusion discontinue. Pour les installations oxycombustion, l'expression, des émissions corrigées à 8 % d'oxygène, a peu de valeur et les émissions provenant de ces installations doivent être analysées en termes de masse.
- Pour les autres gaz, y compris les émissions des four pour traitement thermiques et des fours de séchage, sans incinération des gaz résiduels, température 0°C, 273K, pression 101,3 kPa, sans correction pour l'oxygène ou les concentrations en vapeur d'eau.

Les niveaux d'émission, donnés dans ce chapitre, sont basés sur des moyennes, non sur des valeurs maximales à court terme, qui devraient probablement être plus élevées. Les niveaux d'émission présentés sont basés sur une période moyenne représentative, supérieure à 30 minutes et inférieure à 24 heures.

### Facteurs de conversion

Les niveaux d'émission, associés aux MTD, représentent des fourchettes pour la concentration des émissions, mg/m<sup>3</sup>, et l'émission massique, kg/tonne de verre fondu. Cette double approche permet de faire une comparaison entre les différentes techniques de fusion et fournit une indication sur l'impact relatif sur l'environnement des émissions atmosphériques. Pour les rejets des fours à combustion fossile, la relation entre la concentration des émissions et la masse émise, par tonne de verre fondu, dépend surtout de la consommation d'énergie spécifique nécessaire à la fusion :

**Emission massique [kg/tonne de verre] = facteur de conversion x concentration des émissions [mg/Nm<sup>3</sup>]**

où :                   facteur de conversion =  $(Q/P) \times 10^{-6}$   
et                     Q = volume des effluents gazeux en Nm<sup>3</sup>/h  
                          P = taux de production en tonne de verre/h

Le volume des effluents gazeux dépend principalement de la consommation d'énergie, du type de combustible, et du comburant, air ou O<sub>2</sub>. La consommation d'énergie est une fonction complexe du type de four, principalement du type de verre et du pourcentage de calcin.

Une série de facteurs peut cependant influencer sur la relation entre concentration et débit massique, notamment :

- type de four, température de préchauffage de l'air, méthode de fusion,
- type de verre produit, besoins énergétiques pour la fusion,
- part des différentes sources d'énergie, combustible fossile/chauffage électrique,
- type de combustible fossile, pétrole, gaz,
- type de comburant, oxygène, air, air enrichi en oxygène,
- pourcentage de calcin
- formule de la composition
- âge du four
- taille du four

Il n'y a donc pas de méthode directe pour définir l'ensemble des facteurs de conversion. Dans ce chapitre, les concentrations des émissions, mg/Nm<sup>3</sup>, sont donc données comme valeurs de base des niveaux d'émission associés aux MTD. Pour proposer des fourchettes d'émission massique, kg/tonne de verre fondu, qui sont "généralement équivalentes" à ces concentrations, une série de

facteurs de conversion ont été établis, correspondant à des fours neufs air-combustion, ayant un bon rendement énergétique. On suppose donc une optimisation de la consommation d'énergie qui peut alors être prise en compte dans l'évaluation des MTD. Ces facteurs de conversion sont présentés dans le tableau ci-dessous.

On peut souvent observer des valeurs de consommation d'énergie plus élevées, mais dans ces cas, les performances doivent être comparées aux niveaux d'émission associés aux MTD exprimés en concentrations.

Dans certains cas, fours électriques, chauffage oxycombustion, il est nécessaire d'évaluer les performances uniquement en termes d'émission massiques spécifiques, kg/tonne de verre fondu.

		Facteurs indicatifs permettant de convertir les mg/Nm <sup>3</sup> en kg/tonne de verre fondu
Verre plat		2,5 x 10 <sup>-3</sup>
Verre d'emballage	Cas général	1,5 x 10 <sup>-3</sup>
	Cas particuliers <sup>(2)</sup>	3,0 x 10 <sup>-3</sup>
Fil de silionne		4,5 x 10 <sup>-3</sup>
Gobeletterie	Sodocalcique	2,5 x 10 <sup>-3</sup>
	Cas particuliers <sup>(3)</sup>	Etude au cas par cas (souvent 3,0 x 10 <sup>-3</sup> )
Laine minérale		2 x 10 <sup>-3</sup>
Cubilot de laine de roche		2,5 x 10 <sup>-3</sup>
Verre spécial – Verre TV – Ecran		3 x 10 <sup>-3</sup>
Verre spécial – Verre TV – Tube cathodique		2,5 x 10 <sup>-3</sup>
Borosilicate (tube)		4 x 10 <sup>-3</sup>
Vitrocéramique		6,5 x 10 <sup>-3</sup>
Verre à eau		1,5 x 10 <sup>-3</sup>
Verre d'éclairage (sodocalcique)		2,5 x 10 <sup>-3</sup>

**Tableau 5.1 : Facteurs indicatifs de conversion des mg/m<sup>3</sup> en kg/tonne de verre fondu <sup>(1)</sup>**

1. Ce tableau correspond uniquement aux fours air-combustible.
2. Les cas particuliers correspondent à des conditions moins favorables, petits fours spéciaux ayant une production inférieure à 100 t/jour, et un taux de calcin inférieur à 30 %. Cette catégorie ne représente que 1 à 2 % de la production de verre d'emballage.
3. Cas particuliers correspondant à des conditions moins favorables et/ou à des verres non sodocalciques, verres borosilicatés, vitrocéramique, cristal ordinaire et rarement cristal au plomb 24%.

### 5.2.1 Stockage et manutention des matières

Les techniques décrites au Chapitre 4, pour le stockage et la manutention des matières, peuvent être utilisées, en les associant de manière appropriée à une installation particulière, de sorte que les émissions provenant de ces activités soient négligeables. En cas de problèmes, dans une installation particulière, la bonne application de ces techniques apporte en général une solution.

### 5.2.2 Particules

D'une manière générale, on considère que la MTD, pour lutter contre les émissions de poussières issues des fours de verrerie, consiste à utiliser un précipitateur électrostatique ou un

filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Les performances, associées à ces techniques, sont examinées au Chapitre 4.

Des représentants de l'industrie du verre qui participaient au Groupe de Travail Technique ont indiqué qu'à leur avis les avantages pour l'environnement des techniques secondaires, comparés à ceux procurés par les mesures primaires, ne justifiaient pas dans tous les cas un accroissement des coûts pour la production de verre sodocalcique. Ce point a été particulièrement souligné pour les fours sodocalciques, de petite capacité, qui obtiennent déjà des taux relativement peu élevés pour les poussières et des taux bas pour les métaux.

La raison est peut-être que le rapport coût-efficacité des mesures primaires, coûts par kg de poussière éliminée, est supérieur à celui des techniques secondaires. On considère cependant, d'une manière générale, que la comparaison, dans le cadre de la définition de "meilleure" donnée dans la Directive PCIP à savoir "la plus efficace pour assurer une très bonne protection de l'environnement dans son ensemble", justifie que des techniques secondaires soient choisies comme MTD. Les facteurs déterminants sont d'une part la meilleure performance des techniques secondaires, pour ce qui est des poussières, des métaux, des particules fines et des rejets gazeux et, d'autre part, l'utilisation généralisée de ces techniques, dans des conditions économiques normales, dans des fours de tous types et de toutes capacités.

En outre, il est généralement admis que les économies d'échelle ne jouent pas de rôle décisif pour déterminer la MTD, même pour les plus petits fours visés par la Directive PCIP.

Les avantages et inconvénients des techniques primaires et secondaires sont examinés au Paragraphe 4.4.1.7. Dans ce chapitre toutefois, on estime que le dépoussiérage secondaire, tout bien considéré, représente la MTD, pour la plupart des fours de verrerie, sauf si des valeurs d'émission équivalentes peuvent être obtenues avec des mesures primaires.

### 5.2.3 Oxydes de soufre

Dans la plupart des formules de verre, les teneurs en soufre, dans la composition, sont déjà réduites au minimum, proportionnellement à la formule du verre et aux exigences de qualité du produit. Il est envisagé, dans la plupart des cas, que la MTD, pour les émissions de poussières, fera intervenir un système de dépoussiérage, auquel sera souvent associé un lavage des gaz acides. Les déchets soufrés générés peuvent normalement être recyclés, avec les matières premières de fusion, pour éviter la production d'effluents solides. Au besoin, ce paramètre est pris en compte dans les niveaux d'émission, associés aux MTD, qui sont proposés dans ce document. Les principaux facteurs, intervenant dans les émissions de Sox, sont donc le choix du combustible, le type de verre et les aspects liés au recyclage des poussières récupérées. Le système d'épuration peut lui aussi être optimisé, pour réduire d'autres gaz acides, et les chiffres présentés dans les prochains paragraphes, sont généralement basés sur la mise en place d'un système comme celui-ci.

Lorsque les teneurs en soufre de la composition sont très faibles, ou même nulles, et que le combustible utilisé est du gaz naturel, un système de lavage des gaz acides n'est pas forcément nécessaire. Dans ces conditions, toutefois, les émissions de SOx seront en général inférieures aux chiffres correspondant aux compositions contenant du soufre avec lavage des gaz acides.

Le choix entre le gaz et le fioul dépend en grande partie des conditions économiques et il n'entre pas dans le cadre de ce document de spécifier lequel de ces carburants correspond à la MTD. Lorsqu'une source de gaz naturel est disponible et que les conditions économiques le permettent, l'utilisation de celui-ci se traduit par des émissions de SOx moins importantes. Avec le fioul, une teneur en soufre de 1 % ou moins est la valeur correspondant à la MTD. Une teneur en soufre supérieure peut toutefois être acceptable, si un système d'épuration est installé, de façon à obtenir un niveau d'émission équivalent et si un circuit approprié d'élimination est

identifié, pour les matières recueillies. Il est établi que dans certains Etats membres des facteurs économiques rendent plus difficile l'utilisation de fioul à faible teneur en soufre.

#### 5.2.4 Autres substances

Dans le cadre de ce document, les classifications présentées dans le tableau ci-dessous s'appliquent aux métaux et composés métalliques. Les métaux qui n'entrent pas dans le cadre de ces groupes sont traités individuellement, en raison de leur plus forte toxicité, ou uniquement pour la catégorie de poussières concernées. Car leur faible toxicité ne justifie pas en général une étude particulière.

Lorsque les niveaux d'émission, pour les métaux, figurent dans ce document, ils incluent les métaux présents dans la phase gazeuse, liés aux poussières, voir 4.4.1.7.

Métaux et leurs composés de Groupe 1	Métaux et leurs composés de Groupe 2
Arsenic	Antimoine
Cobalt	Plomb
Nickel	Chrome III
Sélénium	Cuivre
Chrome VI	Manganèse
	Vanadium
	Etain

Tableau 5.2 : Classifications des métaux et de leurs composés

### 5.3 Verre d'emballage

#### 5.3.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD pour le dépoussiérage est un précipitateur électrostatique ou un filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission, associé à ces techniques, est de 5 à 30 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à moins de 0,1 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs inférieures de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission des poussières.

#### 5.3.2 Oxydes d'azote

Le secteur du verre d'emballage utilise une grande variété de types et de tailles de fours et il existe de nombreuses techniques primaires et secondaires disponibles, permettant d'atteindre une bonne efficacité de réduction des Nox. Il existe également un certain nombre de techniques permettant d'obtenir des taux très bas de NOx, mais qui ne peuvent être appliquées que dans certaines conditions. Elles sont présentées au Chapitre 4, par exemple, le four à faible émission de NOx, le four Flex ou la fusion électrique. On trouve aussi des techniques qui sont plus facilement applicables, mais qui ne constituent pas forcément l'option la mieux appropriée, en toutes circonstances, par exemple le chauffage oxycombustion et le préchauffage composition/calcin.

La sélection des techniques correspondant à la MTD dépend en grande partie des problèmes spécifiques au site. Les principales techniques, ou une association de celles-ci, les plus susceptibles de correspondre à la MTD, dans ce secteur, sont les mesures primaires,

modifications de la combustion, le procédé 3R/polissage au feu, pour les fours régénératifs, le chauffage oxycombustion, la réduction non catalytique sélective, SNCR, ou la réduction catalytique sélective, SCR. On estime que le niveau d'émission des oxydes d'azote, de formule  $\text{NO}_2$ , associé aux techniques qui correspondent généralement à la MTD, est compris entre 500 et 700  $\text{mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut normalement de 0,5 à 1,1 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs les plus basses de cette fourchette correspondent en général à une réduction secondaire ou à une fusion à l'oxygène. Toutefois, lorsque d'autres techniques permettent d'obtenir des valeurs comprises dans cette fourchette et qu'elles sont techniquement et économiquement viables, elles peuvent aussi représenter la MTD.

Lorsque les techniques les plus appropriées, pour une situation donnée, nécessitent un report jusqu'à la prochaine réfection, par exemple, oxycombustion ou modification de la géométrie du four, ces taux ne sont parfois atteints qu'après la réfection. En adoptant uniquement des mesures primaires, on peut escompter des niveaux d'émission de 600 à 850  $\text{mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut à 0,9 – 1,3 kg/tonne de verre fondu, pour de nombreux fours air-combustible.

Pour les procédés dans lesquels entre un fort pourcentage de composés de nitrate dans la composition, les niveaux d'émission indiqués ci-dessus sont parfois difficiles à réaliser, sans une réduction des polluants secondaires. Si l'emploi de nitrates est très fréquent ou permanent, ou si les rejets sont très élevés, il peut être nécessaire de mettre en place des techniques secondaires. Dans ce secteur, seuls les produits spécialisés, flacons de parfum par exemple, entrent dans cette catégorie, ce qui représente moins de 1 % de la production. Sauf dans des cas exceptionnels, on estime que le niveau d'émission, associé aux MTD, devrait être inférieur à 1000  $\text{mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 3,0 kg/tonne de verre fondu. Si l'emploi de nitrates n'est pas fréquent, le coût des mesures secondaires, lorsqu'elles ne sont pas indispensables pour d'autres situations, n'est probablement pas justifié. Si cela est possible, la première étape consiste à minimiser l'emploi de nitrates, dans la composition, avant d'envisager une réduction des polluants secondaires.

### 5.3.3 Oxydes de soufre

Pour les niveaux d'émission, donnés ci-dessous, on suppose la mise en place d'une réduction secondaire des poussières, avec lavage des gaz acides par voie sèche ou semi-sèche, si besoin est. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , sont donc en général les suivants :

- Chauffage au gaz naturel : 200 à 500  $\text{mg/Nm}^3$ , soit généralement 0,3 à 0,75 kg/tonne de verre fondu
- Chauffage au fioul : 500 à 1200  $\text{mg/Nm}^3$ , soit généralement 0,75 à 1,8 kg/tonne de verre fondu

Ces valeurs correspondent à des situations où la priorité est la réduction des émissions de  $\text{SO}_x$  et prennent en compte un recyclage complet des poussières, dans de nombreux cas. Toutefois, lorsque la réduction des déchets, par filtration des poussières, et le recyclage du calcin sont estimés hautement prioritaires, dans le cadre d'une approche intégrée de protection de l'environnement et que, après un bilan massique, ces mesures ne permettent pas d'obtenir ces valeurs, les niveaux d'émission suivants peuvent correspondre aux niveaux associés à la MTD :

- Chauffage au gaz naturel : jusqu'à 800  $\text{mg/Nm}^3$ , soit généralement 1,2 kg/tonne de verre fondu
- Chauffage au fioul : jusqu'à 1500  $\text{mg/Nm}^3$ , soit généralement 2,25 kg/tonne de verre fondu

Ces aspects sont développés dans les paragraphes 4.4.3.3 et 5.2.3, ainsi que dans l'annexe sur le bilan soufré.



### 5.3.4 Autres émissions issues de la fusion

En général dans ce secteur, on considère que la MTD est la sélection des matières premières, associée à un lavage des gaz acides si nécessaire. Le lavage des gaz acides n'est pas toujours indispensable pour protéger le matériel de réduction des polluants ou pour atteindre les valeurs données ci-dessus, pour les oxydes de soufre. Dans ce cas, le lavage des gaz acides est jugé correspondre à la MTD, si les taux indiqués ci-dessous ne peuvent être obtenus par les mesures primaires. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Chlorures de formule HCl  $<30 \text{ mg/Nm}^3$
- Fluorures de formule HF  $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux Groupes 1 + 2  $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux Groupe 1  $<1 \text{ mg/Nm}^3$

Les classifications pour les métaux et leurs composés sont données dans le Tableau 5.2

### 5.3.5 Procédés situés en aval

La principale source potentielle d'émission, émanant des procédés en aval, est le traitement de surface à chaud. Un certain nombre de techniques, décrites au Chapitre 4, peuvent être utilisées pour traiter les émissions, et les techniques choisies dépendront des paramètres spécifiques à l'installation. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Chlorures de formule HCl  $<30 \text{ mg/Nm}^3$
- Particules  $<20 \text{ mg/Nm}^3$
- Etain  $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Composés organostanniques  $<1 \text{ mg/Nm}^3$

Les vapeurs, du traitement de surface à chaud, peuvent également être traitées avec les effluents gazeux du four, dans un système commun de réduction des polluants gaz acides/poussières.

## 5.4 Verre plat

### 5.4.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD pour le dépoussiérage est un précipitateur électrostatique ou un filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission, associé à ces techniques est de 5 à  $30 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 0,1 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs inférieures de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux peut se traduire par une baisse du niveau d'émission pour les poussières.

### 5.4.2 Oxydes d'azote

En général dans ce secteur, on estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, pour les oxydes d'azote, de formule  $\text{NO}_2$ , est compris entre 500 et  $700 \text{ mg/Nm}^3$  ce qui équivaut à 1,25 – 1,75 kg/tonne de verre fondu. Ces chiffres sont principalement basés sur l'utilisation de

techniques primaires ou sur le procédé 3R/polissage au feu, associé à des techniques primaires. Toutefois, d'autres techniques, SNCR et SCR par exemple, peuvent être adoptées, le cas échéant, pour obtenir ces niveaux, et être considérées comme des MTD. Avec le procédé 3R/polissage au feu ou la réduction catalytique sélective, on devrait obtenir des niveaux d'émission, tendant vers l'extrémité inférieure de la fourchette.

Lorsque les techniques les plus appropriées, pour une situation donnée, nécessitent un report jusqu'à la prochaine réfection, par exemple oxycombustion ou modification de la géométrie du four, ces taux ne sont parfois atteints qu'après la réfection. En utilisant uniquement les modifications de combustion, on peut escompter des niveaux d'émission inférieurs à 850 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à moins de 2,2 kg/tonne de verre fondu, pour de nombreux fours air-combustible. La technique 3R peut habituellement être appliquée pendant une campagne de fusion.

Pour les procédés dans lesquels entre un fort pourcentage de composés de nitrate dans la composition, les niveaux d'émission, indiqués ci-dessous, sont parfois difficiles à réaliser sans une réduction des polluants secondaire. Si l'emploi de nitrates est très fréquent ou si les rejets sont très élevés, il peut être nécessaire de mettre en place des techniques secondaires. Pour ces applications, on estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, est inférieur à 850 mg/Nm<sup>3</sup> ce qui équivaut en général à moins de 2,2 kg/tonne de verre fondu. Si l'emploi de nitrates n'est pas fréquent, le coût de mesures secondaires, lorsqu'elles ne sont pas indispensables pour d'autres situations, n'est probablement pas justifié. Si cela est possible, la première étape consiste à minimiser l'emploi de nitrates, dans la composition, avant d'envisager une réduction des polluants secondaires.

### 5.4.3 Oxydes de soufre

Pour les niveaux d'émission, donnés ci-dessous, on suppose la mise en place d'une réduction secondaire des poussières, avec lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche, si besoin est. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule SO<sub>2</sub>, sont donc en général les suivants :

- Chauffage au gaz naturel : 200 à 500 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement 0,5 à 1,25 kg/tonne de verre fondu
- Chauffage au fioul : 500 à 1200 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement 1,25 à 3 kg/tonne de verre fondu

Ces valeurs correspondent à des situations où la priorité est la réduction des émissions de SO<sub>x</sub> et prennent en compte un recyclage complet des poussières dans de nombreux cas. Toutefois, lorsque la réduction des déchets par filtration des poussières et le recyclage du calcin sont estimés hautement prioritaires, dans le cadre d'une approche intégrée de protection de l'environnement, et qu'après un bilan massique, ces mesures ne permettent pas d'obtenir ces valeurs, les niveaux d'émission suivants peuvent correspondre aux niveaux associés à la MTD :

- Chauffage au gaz naturel : jusqu'à 800 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement 2 kg/tonne de verre fondu
- Chauffage au fioul : jusqu'à 1500 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement 3,75 kg/tonne de verre fondu

Ces aspects sont développés dans les paragraphes 4.4.3.3 et 5.2.3, ainsi que dans l'annexe sur le bilan soufré.

### 5.4.4 Autres émissions issues de la fusion

En général dans ce secteur, on considère que la MTD est la sélection des matières premières, pour minimiser les émissions, associée à un lavage des gaz acides et à un dépoussiérage. On estime donc que les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous sont les suivants :

- Chlorures , de formule HCl <30 mg/Nm<sup>3</sup>
- Fluorures , de formule HF <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupes 1 + 2 <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupe 1 <1 mg/Nm<sup>3</sup>

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

#### 5.4.5 Procédés situés en aval

Un certain nombre de techniques, décrites au Chapitre 4, peuvent être utilisées pour traiter les émissions en aval, et les techniques choisies dépendront des paramètres spécifiques à l'installation. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous devraient être les suivants :

- Chlorures , de formule HCl <30 mg/Nm<sup>3</sup>
- Fluorures , de formule HF <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Particules <20 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupes 1 + 2 <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupe 1 <1 mg/Nm<sup>3</sup>

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

### 5.5 Fil de silionne

#### 5.5.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour le dépoussiérage, est un précipitateur électrostatique ou un filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission MTD associé à ces techniques est de 5 à 30 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à moins de 0,14 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs inférieures de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission des poussières.

Dans ce secteur, étant donné la nature des poussières, le refroidissement des effluents gazeux et l'emplacement du système de réduction des polluants, sont très importants pour optimiser leur efficacité. Dans certains cas, un dispositif de réduction des polluants peut être déjà installé et répondre aux critères de la MTD, dans sa mise en œuvre générale. Mais son installation a peut-être été prévue pour des critères moins exigeants et son emplacement n'est pas idéal. Si le dispositif existant est capable de donner un niveau d'émission de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, et non de 30 mg/Nm<sup>3</sup>, comme décrit ci-dessus, les coûts de remplacement ou de modification majeure, avant la prochaine réfection, peuvent être disproportionnés par rapport aux avantages acquis.

Certaines formulations innovantes peuvent donner des niveaux d'émission proches de ceux mentionnés ci-dessus, sans réduction des polluants secondaires. Lorsque c'est le cas, une évaluation spécifique au site doit être réalisée, pour ce qui est de la MTD.

### **5.5.2 Oxydes d'azote**

Au moment de la rédaction de ce document, ce secteur traverse une période de transition en matière de lutte contre la pollution par les Nox, et il est difficile de tirer des conclusions définitives, quant aux MTD. Les niveaux d'émission sont souvent supérieurs à 1000 mg/Nm<sup>3</sup>, soit plus de 4,5 kg/tonne de verre fondu. Un certain nombre d'études ont été menées, sur les modifications de combustion, et on note quelques bons résultats. Toutefois, en raison de problèmes spécifiques au secteur, notamment les gros besoins en énergie, il n'est pas envisagé de pouvoir obtenir des niveaux d'émission bien inférieurs à 800 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à 3,6 kg/tonne de verre fondu, pour la plupart des opérations où seules des modifications classiques de combustion ont été mises en œuvre.

Il n'y a pas d'exemples connus de SNCR ou de SCR, dans ce secteur. On estime que la SCR est peu susceptible d'être applicable dans un proche avenir, car la condensation du borate dans le catalyseur pose des problèmes. L'adoption de la SNCR ne semble pas rencontrer des obstacles techniques majeurs et, lorsqu'elle est mise en œuvre, elle devrait permettre d'obtenir des réductions de 40 à 70 %, en fonction de son application exacte.

On compte actuellement 6 fours oxycombustion en Europe, sur 26, et plusieurs autres exemples ailleurs dans le monde. Le nombre de fours oxycombustion est en augmentation et il n'existe aucun obstacle technique majeur à leur mise en place. Il reste cependant quelques incertitudes, quant aux incidences économiques de la technique, ainsi que des inquiétudes quant aux conséquences, sur la durée de vie des réfractaires. La technique est plus répandue dans d'autres secteurs. Mais elle est de mieux en mieux acceptée. Appliquée ici, elle devrait permettre d'assurer des valeurs entre 0,5 et 1,25 kg/tonne de verre fondu.

En général dans ce secteur, on estime que la MTD, pour les oxydes d'azote, de formule NO<sub>2</sub>, est probablement la fusion à l'oxygène. Le niveau d'émission, associé aux MTD, devrait être compris entre 0,5 et 1,5 kg/tonne de verre fondu. Cette conclusion n'est pas définitive, mais plutôt un jugement objectif, basé sur les informations disponibles, au moment de la rédaction de ce document. Il est établi que la technique comporte encore un risque financier, mais on pense qu'elle sera de plus en plus acceptée, en tant que MTD, dans le moyen terme. De nombreux industriels programment sa mise en œuvre au moment de la réfection. Pour la plupart des applications dans ce secteur, il n'existe actuellement aucune autre technique capable d'assurer les mêmes niveaux d'émission, pour des coûts comparables. Lorsque d'autres techniques sont utilisables, le niveau d'émission pour une MTD comparable devrait être compris entre 500 et 700 mg/Nm<sup>3</sup>.

### **5.5.3 Oxydes de soufre**

Pour les niveaux d'émission donnés ci-dessous, on suppose la mise en place d'une réduction secondaire des poussières, avec lavage des gaz acides par voie sèche ou semi-sèche, si besoin est. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule SO<sub>2</sub>, devraient donc en général être les suivants :

- Chauffage au gaz naturel : moins de 200 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement moins de 0,9 kg/tonne de verre fondu. Lorsque des sulfates sont utilisés comme agents d'affinage, cette concentration peut atteindre 800 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement moins de 3,6 kg/tonne de verre fondu.
- Chauffage au fioul : 500 à 1000 mg/Nm<sup>3</sup>, soit généralement 2,25 à 4,5 kg/tonne de verre fondu.

Les valeurs les plus élevées de ces fourchettes correspondent aux situations où la poussière recueillie est recyclée dans le four. Si la poussière n'est pas recyclée, les émissions devraient être inférieures aux maximums indiquées.

### 5.5.4 Autres émissions issues de la fusion

En général dans ce secteur, on considère que la MTD correspond à des mesures primaires, ou à un lavage des gaz acides, associé à un dépoussiérage. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Chlorures , de formule HCl  $<30 \text{ mg/Nm}^3$
- Fluorures , de formule HF  $5 \text{ à } 15 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux , Groupes 1 + 2  $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux , Groupe 1  $<1 \text{ mg/Nm}^3$

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

Certaines formules, sans fluorure ou à faible teneur en fluorure, peuvent se traduire, sans réduction des polluants secondaire, par des niveaux d'émission de HF proches des chiffres donnés ci-dessus, sans nécessairement les atteindre. Lorsque c'est le cas, une évaluation spécifique au site doit être réalisée, pour ce qui est de la MTD.

### 5.5.5 Procédés en aval

Les émissions, associées aux procédés en aval, peuvent être très variables, et on peut mettre en place une grande variété de techniques primaires et secondaires. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, devraient être compris entre 5 et 20  $\text{mg/Nm}^3$ , pour les particules, et entre 5 et 50  $\text{mg/Nm}^3$ , pour les composés organiques volatiles.

## 5.6 Gobeletterie

D'une manière générale, et lorsqu'elle est économiquement viable, c'est surtout la fusion électrique, qui est estimée être la MTD, pour la production de cristal au plomb 24%, de cristal et de verre opale. Car cette technique permet de combattre efficacement les éventuelles émissions d'éléments volatiles. Lorsque la formule du cristal au plomb est moins volatile, d'autres techniques peuvent être envisagées pour déterminer la MTD pour une installation donnée.

### 5.6.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour le dépoussiérage est un précipitateur électrostatique, ou un filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission, associé à ces techniques, est de 5 à 30  $\text{mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 0,1 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs inférieures à la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission pour les poussières.

Pour les formules sodocalciques, se reporter également au Paragraphe 5.2.2, ci-dessus et au Paragraphe 4.4.1.7. Ces questions sont particulièrement intéressantes, pour ce secteur, en raison de sa nature spécifique, présentée au Paragraphe 5.6.2 ci-dessous.

### 5.6.2 Oxydes d'azote

Au moment de la rédaction de ce document, il y a peu d'informations disponibles, sur la réduction des Nox, dans ce secteur et il est difficile de tirer des conclusions définitives, quant aux MTD. Les émissions de Nox, pour les fours air-combustible, sont généralement comprise entre 1500 et 2000 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à 3,75 – 5 kg/tonne de verre fondu.

La nature de ce secteur soulève un certain nombre de questions qui peuvent influencer sur les options choisies, pour la lutte contre les Nox. Par exemple, si on compare ce secteur au verre d'emballage, on observe un certain nombre de différences notables, basées principalement sur les critères de qualité du produit et des volumes de production, moins importants. Les fours sont en moyenne nettement plus petits, < 160 tonnes/jour, seul le calcin interne est utilisé, les conditions doivent être plus oxydantes, les teneurs en nitrates sont donc plus élevées. Le four fonctionne à une température plus élevée et la durée de séjour est jusqu'à 50 % plus longue. Tous ces facteurs conduisent à une consommation d'énergie spécifique, plus élevée, et à un plus grand risque de formation de Nox.

Un certain nombre de travaux ont été réalisés, sur les modifications de combustion et, dans certains cas, des réductions substantielles de NOx ont été obtenues. Toutefois, l'importance des réductions obtenues dans certains secteurs n'a pas été retrouvée pour la gobeletterie. Mais on estime que de nouveaux progrès sont possibles. Sur la base de l'expérience acquise dans d'autres secteurs, l'application rigoureuse de mesures primaires de combustion pourrait entraîner une réduction des émissions de NOx de 20 à 40 %, c'est-à-dire de l'ordre de 1000 à 1500 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut généralement à 2,5 – 3,75 kg/tonne de verre fondu.

Le secteur utilise un certain nombre de fours électriques. Mais la viabilité économique a ses limites. En règle générale, lorsque la fusion électrique, à 100 % ou majoritairement électrique, est économiquement viable, et en particulier pour la production du cristal au plomb 24%, du cristal ordinaire et du verre opale, la technique est considérée comme MTD. Les émissions de NOx sont limitées à la décomposition du nitrate et le niveau d'émission associé à la MTD serait en général compris entre 0,2 et 1,0 kg/tonne de verre fondu, en fonction du taux de nitrates utilisé. Comme indiqué plus haut, pour les formules de cristal au plomb, moins volatiles, d'autres techniques peuvent être envisagées, pour déterminer la MTD pour une installation particulière.

Il n'y a pas d'exemples connus de SCR, SNCR ou du procédé 3R/polissage au feu dans ce secteur. On compte quelques exemples de chauffage oxycombustion, dans les fours de gobeletterie. Mais, en général, pas à une échelle représentative, des installations classiques air-combustible, à savoir 50 à 160 tonnes/jour. La mise en œuvre de ces techniques ne rencontre pas d'obstacles majeurs et il est probable que la plupart des difficultés pourraient être surmontées avec le temps et l'expérience.

Comme souligné plus haut, il est difficile de tirer des conclusions définitives, sur ce qui correspond à la MTD, pour les émissions de Nox, dans le secteur de la gobeletterie. Lorsque la fusion électrique n'est pas économiquement viable, on peut mettre en place un certain nombre d'autres techniques. Le secteur utilise une grande diversité de fours et le choix, de la technique la plus appropriée, dépend des caractéristiques de l'installation considérée. Etant donné le temps nécessaire, pour l'élaboration et la mise en œuvre de techniques, on estime que le niveau d'émission, associé aux MTD pour les oxydes d'azote, de formule NO<sub>2</sub>, sera compris entre 500 et 700 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut généralement à 0,5 – 1,75 kg/tonne de verre fondu. Les principales techniques, ou une association de celles-ci, les plus susceptibles de correspondre à la MTD ici, sont les mesures primaires, modifications de combustion, le procédé 3R/polissage au feu, pour les fours régénératifs, le chauffage oxycombustion, la SNCR ou la SCR. Il a été avancé que l'adoption du procédé 3R/polissage au feu, pourrait, dans de rares cas, nécessiter une rénovation des matériaux réfractaires, ce qui entraînerait une hausse du coût total et pourrait affecter le choix de la MTD. Pour les fours plus petits, on pourrait envisager des modèles innovants comme le four Flex.



Il est établi que ces niveaux de performance représentent une amélioration significative, par rapport aux performances actuelles, pour de nombreuses installations, et qu'on peut donc les considérer comme des solutions à moyen terme. Il est vivement recommandé d'effectuer des études qui permettront de savoir comment les mesures primaires peuvent réduire les émissions de Nox, pour le fours air-combustible.

Pour les procédés dans lesquels entre un fort pourcentage de composés de nitrate dans la composition, les niveaux d'émission indiqués ci-dessus sont parfois difficiles à réaliser, sans une réduction des polluants secondaires. Si l'emploi de nitrates est très fréquent ou permanent, ou si les rejets sont très élevés, il peut être nécessaire de mettre en place des techniques secondaires. Si l'emploi de nitrates n'est pas fréquent, ou si la mise en œuvre de nouvelles mesures secondaires, n'est pas économiquement viable, un niveau d'émission plus élevé peut représenter la MTD. Dans la mesure du possible, l'emploi de nitrates doit être réduit au minimum. Sauf dans des circonstances tout à fait exceptionnelles, le niveau d'émission, associé à la MTD, devrait être inférieur à  $1500 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 3 kg/tonne de verre fondu.

### 5.6.3 Oxydes de soufre

Pour les niveaux d'émission, donnés ci-dessous, on suppose la mise en place d'une réduction secondaire des poussières, avec lavage des gaz acides par voie sèche ou semi-sèche, si besoin est. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , sont donc en général les suivants :

- Chauffage au gaz naturel :  $200$  à  $500 \text{ mg/Nm}^3$ , soit généralement  $0,5$  à  $1,25 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu. Lorsque les pourcentages de sulfates utilisés sont faibles, ce chiffre est inférieur à  $200 \text{ mg/Nm}^3$ , soit généralement moins de  $0,5 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu.
- Chauffage au fioul :  $500$  à  $1300 \text{ mg/Nm}^3$ , soit généralement  $1,25$  à  $3,25 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu.

Les valeurs les plus élevées de ces fourchettes correspondent aux situations où la poussière recueillie est recyclée dans le four. Si la poussière n'est pas recyclée, les émissions devraient être inférieures aux maximums indiquées.

### 5.6.4 Autres émissions issues de la fusion

En général ici, on considère que la MTD est la sélection des matières premières pour réduire les émissions, associée à un lavage des gaz acides. L'épuration de gaz acides n'est pas toujours indispensable, que ce soit pour protéger le matériel de réduction des polluants, ou atteindre les valeurs, données ci-dessus, pour les Sox. Dans ce cas, le lavage des gaz acides est jugé correspondre à la MTD, si les taux indiqués ci-dessous ne peuvent être obtenus par les mesures primaires. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Chlorures , de formule  $\text{HCl}$   $<30 \text{ mg/Nm}^3$
- Fluorures , de formule  $\text{HF}$   $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux , Groupes 1 + 2  $<5 \text{ mg/Nm}^3$
- Métaux , Groupe 1  $<1 \text{ mg/Nm}^3$

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

Pour la production de cristal au plomb 24% et de cristal ordinaire, des valeurs inférieures à  $5 \text{ mg/Nm}^3$  et à  $1 \text{ mg/Nm}^3$ , pour les métaux, nécessitent généralement l'utilisation de filtres à manche ou d'un précipitateur électrostatique haute efficacité.

### **5.6.5 Procédés en aval**

Les émissions potentielles des procédés en aval concernent principalement la poussière et les vapeurs de gaz acides, émises par la production de cristal au plomb 24% et de cristal ordinaire. Pour les activités qui risquent d'être poussiéreuses, on estime que la MTD est la découpe par voie humide, si cela est possible et, en cas de découpe ou de doucissage à sec, l'extraction vers un filtre à manches. En cas de dégagement de gaz acides ou de vapeurs, la MTD est le dépoussiérage par voie humide. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous devraient être les suivants :

- Fluorures , de formule HF <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Particules <10 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupes 1 + 2 <5 mg/Nm<sup>3</sup>

Dans ce secteur, le risque d'émissions aqueuses est important. Ce sujet est traité dans les Chapitres 3 et 4, et les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour ces activités sont donnés au Paragraphe 5.11.

## **5.7 Verres spéciaux**

Pour ce secteur, le facteur de conversion donné au Tableau 5.1 est compris entre  $1,5 \times 10^{-3}$  ,verre à eau, et  $6,5 \times 10^{-3}$  ,vitrocéramique,, Présenter les émissions massiques ici ne ferait que prêter à confusion car elles correspondent généralement aux concentrations d'émission pour chacun des six facteurs de conversion, Les niveaux d'émission sont donc exprimés uniquement en concentrations et il faut se reporter au Tableau 5.1 pour déterminer l'émission massique correspondante pour chaque type de produit,

### **5.7.1 Poussières**

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour la poussière, est un précipitateur électrostatique ou un filtre à manches, associé si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission, associé à ces techniques, est compris entre 5 et 30 mg/Nm<sup>3</sup>. Les valeurs de la partie inférieure de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission des poussières.

### **5.7.2 Oxydes d'azote**

En général, dans ce secteur, on estime que le niveau d'émission, associé aux MTD, pour les oxydes d'azote, de formule NO<sub>2</sub>, est compris entre 500 et 700 mg/Nm<sup>3</sup>. Ce chiffre est basé principalement sur la fusion à l'oxygène, ainsi que la SNCR ou la SCR. Le secteur des verres spéciaux utilise une grande diversité de types et de tailles de four. D'autres techniques peuvent être mises en œuvre, pour réduire les émissions de Nox, à des taux comparables, et la technique la plus appropriée, dépendra en grande partie des problèmes spécifiques au site. Un certain nombre de techniques permettent également d'obtenir des taux d'émission inférieurs aux valeurs données. Mais elles ne sont pas forcément applicables à toutes les installations. Lorsque les teneurs en nitrates sont élevées, il convient d'envisager d'en minimiser l'emploi, dans la mesure du possible, dans les limites des exigences du procédé et des spécifications des produits.

Pour la production de verre à eau d'une manière générale, on estime que le niveau d'émission associé à la MTD, pour les oxydes d'azote, de formule  $\text{NO}_2$ , est compris entre 500 et 700  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ . Ce chiffre est basé sur la mise en place de techniques primaires ou secondaires. Lorsque les techniques les plus appropriées, pour une situation donnée, nécessitent un report jusqu'à la prochaine réfection, par exemple, oxycombustion ou modification de la géométrie du four, ces niveaux ne sont parfois atteints qu'après la réfection. En adoptant uniquement des mesures primaires, on peut escompter des niveaux d'émission de 600 à 850  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  pour les fours air-combustible.

### 5.7.3 Oxydes de soufre

Pour les niveaux d'émission donnés ci-dessous, on suppose la mise en place d'une réduction secondaire des poussières, avec lavage des gaz acides par voie sèche ou semi-sèche, si besoin est. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , sont donc en général les suivants :

- Chauffage au gaz naturel : 200 à 500  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , lorsque les teneurs en sulfates utilisés sont faibles, ce chiffre est inférieur à 200  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .
- Chauffage au fioul : 500 à 1200  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .

Les valeurs les plus élevées de ces fourchettes correspondent aux situations où la poussière, recueillie est recyclée dans le four. Si la poussière n'est pas recyclée, les émissions devraient être inférieures aux maximums indiquées.

### 5.7.4 Autres émissions issues de la fusion

En général dans ce secteur, on considère que la MTD est la sélection des matières premières pour réduire les émissions, associée à un lavage des gaz acides. L'épuration de gaz acides n'est pas toujours indispensable, que ce soit pour protéger le matériel de réduction des polluants ou atteindre les valeurs données ci-dessus, pour les Sox. Dans ce cas, le lavage des gaz acides est jugé correspondre à la MTD, si les taux indiqués ci-dessous ne peuvent être obtenus par les mesures primaires. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Chlorures , de formule  $\text{HCl}$  <30  $\text{mg}/\text{Nm}^3$
- Fluorures , de formule  $\text{HF}$  <5  $\text{mg}/\text{Nm}^3$
- Métaux , Groupes 1 + 2 <5  $\text{mg}/\text{Nm}^3$
- Métaux , Groupe 1 <1  $\text{mg}/\text{Nm}^3$

Les classifications pour les métaux et leurs composés sont données dans le Tableau 5.2.

### 5.7.5 Procédés en aval

Les émissions des procédés en aval peuvent être très variables, et une large gamme de techniques primaires et secondaires peut être adoptée. Pour les activités qui risquent d'être poussiéreuses, on estime que la MTD est une réduction des poussières, en effectuant par voie humide les opérations de découpe, de doucissage et de polissage et, lorsque ces opérations sont réalisées à sec, l'extraction vers un filtre à manches. En cas de dégagement de gaz acides ou de vapeurs, la MTD est l'épuration par voie humide. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Fluorures , de formule  $\text{HF}$  <5  $\text{mg}/\text{Nm}^3$

- Particules <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupes 1 + 2 <5 mg/Nm<sup>3</sup>
- Métaux , Groupe 1 <1 mg/Nm<sup>3</sup>

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

Dans ce secteur, le risque d'émission aqueuse est important. Ce sujet est traité dans les Chapitres 3 et 4, et les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour ces activités, sont donnés au Paragraphe 5.11.

## 5.8 Laine minérale

### 5.8.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour la poussière, est un précipitateur électrostatique ou un filtre à manches. Pour la production de laine de verre, l'utilisation d'un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche, n'est pas jugé nécessaire, pour protéger le matériel, car presque tous les fours sont à gaz ou électriques. Le niveau d'émission, associé à ces techniques, est compris entre 5 et 30 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à moins de 0,1 kg/tonne de verre fondu. Les valeurs inférieures de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission, pour les poussières. Les cubilots à vent chaud sont généralement équipés de filtres à manche et non de précipitateurs électrostatiques, en raison du risque d'explosion.

Pour la production de laine de verre, étant donné la nature des poussières, le refroidissement des effluents gazeux et l'emplacement du système de réduction des polluants, sont très importants pour optimiser leur efficacité. Dans certains cas, un dispositif de réduction des polluants peut être déjà installé et répondre aux critères de la MTD, dans sa mise en œuvre générale. Mais son installation a peut-être été prévue pour des critères moins exigeants et son emplacement n'est pas idéal. Si le dispositif existant est capable de donner un niveau d'émission de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, et non de 30 mg/Nm<sup>3</sup>, comme décrit ci-dessus, les coûts de remplacement ou de modification majeure, avant la prochaine réfection, peuvent être disproportionnés, par rapport aux avantages acquis.

### 5.8.2 Oxydes d'azote

En général pour la production de laine de verre, on considère que la MTD, pour les oxydes d'azote, de formule NO<sub>2</sub>, est l'utilisation d'un chauffage oxycombustion ou d'une fusion principalement électrique. On estime que le niveau d'émission, associé aux MTD, est compris entre 500 et 700 mg/Nm<sup>3</sup>, ce qui équivaut en général à 0,5 – 1,4 kg/tonne de verre fondu. Dans la plupart des applications, le chauffage oxycombustion ou la fusion principalement électrique, devraient permettre d'atteindre des niveaux d'émission inférieurs à 1 kg/tonne de verre fondu. Toutefois, les systèmes classiques air-gaz peuvent parfois donner des émissions comprises dans les fourchettes indiquées, avec des mesures primaires ou secondaires. Dans ce cas, on considère que ces systèmes correspondent également à la MTD.

Lorsque de grosses quantités de nitrates sont nécessaires, dans la composition, par exemple pour recycler des matières contenant une forte teneur d'un élément organique, les niveaux d'émission indiqués ci-dessus, sont parfois difficiles à atteindre, sans une réduction des polluants secondaire ou le passage à une fusion à l'oxygène ou électrique.

Si l'emploi de nitrates est très fréquent ou permanent, ou si les rejets sont très élevés, ces techniques correspondent probablement à la MTD et devraient permettre d'obtenir moins de  $700 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 1,4 kg/tonne de verre fondu.

Les cubilots de laine de roche ne génèrent pas normalement d'émissions importantes de  $\text{NO}_x$  et des valeurs inférieures à 0,5 kg/tonne de verre fondu, peuvent être obtenues, sans prévention particulière. Pour les fours à bassin, on estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, est équivalent à celui de la production de laine de verre.

### 5.8.3 Oxydes de soufre

Pour la production de laine de verre en général, les émissions d'oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , ont tendance à être très peu importantes. Presque tous les fours sont à gaz ou électriques et les teneurs en sulfates utilisées sont très faibles. Dans ces conditions, on estime que les émissions de  $\text{SO}_x$  devraient être inférieures à  $50 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 0,1 kg/tonne de verre fondu, sans mesures particulières de réduction des polluants. Si les fours fonctionnent au fioul, un lavage des gaz acides est habituellement nécessaire, pour protéger le matériel de dépoussiérage, auquel cas on estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, est compris entre 300 et  $1000 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à 0,6 – 2,0 kg/tonne de verre fondu.

Pour la production de laine de roche, on considère que le niveau d'émission, associé aux MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , est inférieur à  $600 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 1,5 kg/tonne de verre fondu. Ces valeurs correspondent à des situations où la priorité est donnée au recyclage des déchets de fabrication et à la prévention de nouveaux effluents solides qu'il faudrait éliminer. Toutefois, lorsque la priorité est donnée à la réduction des émissions de  $\text{SO}_x$ , dans le cadre d'une approche intégrée de protection de l'environnement, et qu'après un bilan massique, ces mesures ne permettent pas d'obtenir ces valeurs, le lavage des gaz acides peut correspondre à la MTD. Ces dispositifs représentent des coûts importants et les matières recueillies ne peuvent pas en général être recyclées efficacement, ce qui entraîne la production d'effluents solides qu'il faut éliminer. Lorsque le lavage des gaz acides est jugé correspondre à la MTD, l'épuration à sec est probablement la technique la plus économique et efficace. Dans ce cas, on estime que le niveau d'émission associé à la MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , est inférieur à  $200 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 0,5 kg/tonne de verre fondu.

Les niveaux d'émission donnés ci-dessus correspondent surtout à la fusion de charges de roche. Mais lorsque la charge renferme des briquettes agglomérées au ciment, les teneurs en soufre sont augmentées, car le ciment en contient. L'incidence sur les émissions de  $\text{SO}_2$  dépend évidemment de la quantité de matières recyclées en briquettes. Par exemple, lorsqu'on remplace 45% de roche par des briquettes, on estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, est inférieur à  $1100 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui en général équivaut à moins de 2,7 kg/tonne de verre fondu. Lorsque la priorité est la réduction du  $\text{SO}_2$ , on estime généralement que le lavage des gaz acides correspond à la MTD et que le niveau d'émission associé est inférieur à  $350 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de 0,8 kg/tonne de verre fondu. Une substitution supérieure à 45 % est rare et il faudrait établir un bilan soufré, dans chaque installation, afin de déterminer les niveaux d'émission appropriés, correspondant à la MTD.

Si les briquettes contiennent également des poussières recyclées, recueillies par un dispositif antipollution, on observera une augmentation des teneurs en soufre qui, dans les poussières recueillies, varient énormément d'une installation à l'autre, en général entre 0,05 et 0,28 %. Les niveaux d'émission, associés à la MTD, sont données ci-dessous. Comme souligné plus haut, il faudrait établir un bilan soufré, pour chaque installation, afin de déterminer les niveaux appropriés correspondant à la MTD.

- Lorsque la priorité est la réduction des déchets :  $1400 \text{ mg/Nm}^3$ , soit généralement 3,4 kg/tonne de verre fondu.
- Lorsque la priorité est la réduction du  $\text{SO}_2$  :  $400 \text{ mg/Nm}^3$ , soit généralement 1,0 kg/tonne de verre fondu.

L'utilisation du laitier de haut fourneau n'est pas en général considérée comme une composante de la MTD et, lorsqu'elle est indispensable aux produits ou au procédé, on estime que la MTD doit inclure une épuration à sec.

### 5.8.4 Autres émissions issues de la fusion

Les rejets d'halogénures et de métaux sont souvent très faibles, pour ces procédés, et les niveaux d'émission, indiqués ci-dessous, peuvent habituellement être atteints, grâce à la sélection des matières premières. Les cubilots de laine de roche sont parfois responsables d'émissions élevées de sulfure d'hydrogène et de monoxyde de carbone. On estime que la MTD, pour les émissions de sulfure d'hydrogène, est la sélection des matières premières ou l'oxydation thermique. On estime que la MTD, pour les émissions de monoxyde de carbone est l'oxydation thermique. Dans ce secteur, les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, sont en général les suivants :

- |  |                        |
|--|------------------------|
| • Chlorures , de formule HCl                 | $<30 \text{ mg/Nm}^3$  |
| • Fluorures , de formule HF                  | $<5 \text{ mg/Nm}^3$   |
| • Sulfure d'hydrogène , $\text{H}_2\text{S}$ | $<5 \text{ mg/Nm}^3$   |
| • Monoxyde de carbone , CO                   | $<200 \text{ mg/Nm}^3$ |
| • Métaux , Groupes 1 + 2                     | $<5 \text{ mg/Nm}^3$   |
| • Métaux , Groupe 1                          | $<1 \text{ mg/Nm}^3$   |

Les classifications pour les métaux et leurs composés sont données dans le Tableau 5.2.

### 5.8.5 Procédés en aval

#### Rejets de la zone de formage et rejets cumulés des zones de formage et de cuisson

Après optimisation des mesures primaires, on estime que la MTD est un précipitateur électrostatique humide, une tour de lavage à garnissage, ou un filtre en laine de roche, en général réservé aux opérations de laine de roche. La performance de ces différentes techniques varie. Le précipitateur humide et le filtre en laine de roche sont plus efficaces pour l'élimination des particules solides et des gouttelette, et la tour de lavage est plus efficace contre les substances gazeuses. Ces questions et la performance, correspondant à chaque technique, sont décrites au Chapitre 4. On estime qu'il n'est pas possible d'utiliser les deux techniques. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| • Particules totales                   | 20 à $50 \text{ mg/Nm}^3$ |
| • Phénol                               | 5 à $15 \text{ mg/Nm}^3$  |
| • Formaldéhyde                         | 5 à $10 \text{ mg/Nm}^3$  |
| • Ammoniac                             | 30 à $65 \text{ mg/Nm}^3$ |
| • Amines                               | $<5 \text{ mg/Nm}^3$      |
| • Composés organiques volatiles totaux | 10 à $50 \text{ mg/Nm}^3$ |

En général, les valeurs les plus élevées, de toutes ces fourchettes, ne devraient pas être envisagées. Avec un précipitateur électrostatique humide ou un filtre en laine de roche, on estime que les émissions de particules totales, devraient se situer vers l'extrémité inférieure de



la fourchette, avec une tour de lavage à garnissage, les émissions gazeuses devraient se situer vers l'extrémité inférieure de la fourchette.

### Rejets du four pour traitement thermique

Dans la production de laine de verre, on estime que la MTD et les niveaux d'émission associés, sont en général ceux indiqués ci-dessus, sauf pour le phénol, pour lequel le niveau d'émission associé est de 5 à 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

Pour la laine de roche, on estime en général que la MTD est l'utilisation d'un incinérateur thermique, et les niveaux d'émission, associés à la MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| • Particules totales            | 5 à 30 mg/Nm <sup>3</sup>  |
| • Phénol                        | <5 mg/Nm <sup>3</sup>  |
| • Formaldéhyde                  | <5 mg/Nm <sup>3</sup>  |
| • Ammoniac                      | <20 à 65 mg/Nm <sup>3</sup> ou < 0,4 kg/tonne de produit fini jusqu'à un maximum de 100 mg/Nm <sup>3</sup> |
| • Amines                        | <5 mg/Nm <sup>3</sup>  |
| • Composés organiques volatiles | <10 mg/Nm <sup>3</sup>   |

Les valeurs d'émission, associées à la MTD, et mentionnées ci-dessus, pour les rejets de la zone de formage et le four pour traitement thermique, ne sont pas toujours obtenues avec ces techniques, dans toutes les situations. Dans le cas de produits de forte densité, ou affichant une forte teneur en liant, les valeurs obtenues avec les techniques habituellement considérées comme des MTD, pour le secteur, pourraient être nettement supérieures. Si ce type de produits constitue la majorité de la production, dans une installation donnée, il convient d'envisager d'autres techniques.

Pour les émissions de la zone de formage et du four, pour traitement thermique, le chiffre donné pour les amines, <5 mg/m<sup>3</sup>, est basé sur l'utilisation de liants, sans amine et de résines non catalysées à l'amine.

Les rejets, provenant du refroidissement des produits, peuvent être traités séparément, ou regroupés avec les rejets de formage et de cuisson. Si le traitement est séparé, on estime que les niveaux d'émission, associés aux MTD, sont identiques ou inférieurs, à ceux de la zone de formage. On estime que la MTD, pour les particules provenant des activités aval, telles que l'usinage et le conditionnement, est l'utilisation d'un filtre à manches. Le niveau d'émission ; associé à la MTD devrait être inférieur à 5 mg/Nm<sup>3</sup>.

## 5.9 Fibre céramique

### 5.9.1 Fusion

On estime que la MTD, dans ce secteur, est la fusion électrique, associée à l'installation d'un filtre à manches. Les niveaux d'émission, associés aux MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- |                                      |                              |
|--------------------------------------|------------------------------|
| • Particules                         | <10 mg/Nm <sup>3</sup>       |
| • Oxydes d'azote , NO <sub>2</sub>   | <0,1 à 0,5 kg/tonne de fonte |
| • Oxydes de soufre , SO <sub>2</sub> | <0,1 à 0,5kg/tonne de fonte  |
| • Chlorures , de formule HCl         | <10 mg/Nm <sup>3</sup>       |
| • Fluorures , de formule HF          | <5 mg/Nm <sup>3</sup>        |
| • Métaux , Groupes 1 + 2             | <5 mg/Nm <sup>3</sup>        |

- Métaux , Groupe 1  $<1 \text{ mg/Nm}^3$

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

### 5.9.2 Procédés en aval

On considère que la MTD, pour toutes les zones où des poussières sont générées, est le captage et l'extraction vers un filtre à manches. Les niveaux d'émission, associés à la MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- Particules  $5 \text{ mg/Nm}^3$
- Fibre céramique , Note 1  $1 \text{ mg/Nm}^3$
- Composés organiques volatiles  $10 \text{ à } 20 \text{ mg/Nm}^3$

Note 1

Dans ce contexte, une fibre est définie comme un objet d'une longueur de plus de  $5 \mu\text{m}$ , d'une largeur inférieure à  $3 \mu\text{m}$  et dont le rapport longueur/largeur est supérieur à 3/1.

## 5.10 Fritte

### 5.10.1 Poussières

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour la poussière, est l'utilisation d'un précipitateur électrostatique ou d'un filtre à manches, associés si nécessaire à un système de lavage des gaz acides, par voie sèche ou semi-sèche. Le niveau d'émission, associé à ces techniques, est compris entre  $5$  et  $30 \text{ mg/Nm}^3$ , ce qui équivaut en général à moins de  $0,1 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu. Les valeurs inférieures de la fourchette correspondent généralement aux filtres à manche. Dans certains cas, l'application de la MTD, pour les émissions de métaux, peut se traduire par une baisse des niveaux d'émission pour les poussières.

Il est établi que ces niveaux de performance représentent une amélioration significative, par rapport aux performances actuelles, pour de nombreux fours continus, et qu'on peut donc les considérer comme des solutions à moyen terme pour ces installations. L'objectif de  $30 \text{ mg/Nm}^3$  ne semble pas représenter d'obstacles techniques majeurs. Etant donné le temps nécessaire à l'élaboration et à la mise en œuvre des techniques appropriées, ce chiffre est réalisable.

### 5.10.2 Oxydes d'azote

En général dans ce secteur, on considère que la MTD, pour les oxydes d'azote, de formule  $\text{NO}_2$ , est la fusion à l'oxygène. Le niveau d'émission, associé à la MTD, devrait être compris entre  $0,5$  et  $1,5 \text{ kg/tonne}$  de verre fondu, soit de  $500$  à  $700 \text{ mg/Nm}^3$ . Si les systèmes classiques air-gaz sont capables d'assurer ce taux, avec des mesures primaires ou secondaires.

Il est établi que ces niveaux de performance représentent une amélioration significative, par rapport aux performances actuelles pour de nombreux fours continus, et qu'on peut donc les considérer comme des solutions à moyen terme, pour ces installations. L'obtention des niveaux d'émission, mentionnés ci-dessus, ne semble pas représenter d'obstacles techniques majeurs. Etant donné le temps nécessaire à l'élaboration et à la mise en œuvre des techniques appropriées, ce chiffre est réalisable.

### 5.10.3 Oxydes de soufre

Pour la production de fritte en règle générale, on considère que la MTD, pour les oxydes de soufre, de formule  $\text{SO}_2$ , est la sélection du combustible, si cela est possible, et l'ajustement de la formule de la composition. On estime que le niveau d'émission, associé à la MTD, est compris entre 0,1 et 0,5 kg/tonne de verre fondu, ce qui équivaut en général à moins de  $200 \text{ mg/Nm}^3$ . Si l'installation fonctionne au fioul, ou si la composition contient des teneurs importantes de sulfate, le niveau d'émission, associé à la MTD, est compris entre 500 et  $1000 \text{ mg/Nm}^3$ .

### 5.10.4 Autres émissions issues de la fusion

En général dans ce secteur, les niveaux d'émission associés à la MTD, pour les polluants mentionnés ci-dessous, devraient être les suivants :

- |                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| • Chlorures , de formule HCl        | $<10 \text{ mg/Nm}^3$ |
| • Fluorures , de formule HF, Note 1 | $<5 \text{ mg/Nm}^3$  |
| • Métaux , Groupes 1 + 2            | $<5 \text{ mg/Nm}^3$  |
| • Métaux , Groupe 1                 | $<1 \text{ mg/Nm}^3$  |

Les classifications, pour les métaux et leurs composés, sont données dans le Tableau 5.2.

#### Note 1

Lorsque la composition contient des proportions importantes de fluorures, cette valeur est basée sur l'utilisation d'un système de lavage des gaz acides.

### 5.10.5 Procédés en aval

Le seul rejet probable, pour ces activités, est l'émission de poussière. On considère que la MTD est l'utilisation d'un filtre à manches. On estime que les niveaux d'émission, associés à la MTD, sont compris entre 5 et  $10 \text{ mg/Nm}^3$  pour les particules et sont inférieurs à  $5 \text{ mg/Nm}^3$ , pour les métaux , Groupes 1 + 2.

## 5.11 Emissions aqueuses

Les émissions aqueuses des activités de verrerie sont généralement peu importantes et ne sont pas spécifiques à cette industrie. Toutefois, un certain nombre d'activités dégagent parfois des émissions plus importantes. On estime en général que les niveaux d'émission, indiqués ci-dessous, sont appropriés, pour protéger l'environnement aqueux, et donnent un aperçu des niveaux d'émission qui pourraient être obtenus, avec les techniques correspondant généralement aux MTD. Ils ne représentent pas nécessairement les niveaux réalisés actuellement dans l'industrie, mais sont basés sur l'expertise du GTT.

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| • Solides en suspension                | $<30 \text{ mg/l}$       |
| • Demande chimique en oxygène , Note 1 | 100 à $130 \text{ mg/l}$ |
| • Ammoniac , Kjeldahl                  | $<10 \text{ mg/l}$       |
| • Sulfate                              | $<1000 \text{ mg/l}$     |
| • Fluorure                             | 15 à $25 \text{ mg/l}$   |
| • Arsenic                              | $<0,3 \text{ mg/l}$      |
| • Antimoine                            | $<0,3 \text{ mg/l}$      |
| • Baryum                               | $<3,0 \text{ mg/l}$      |

• Cadmium	<0,05 mg/l
• Chrome , Total	<0,5 mg/l
• Cuivre	<0,5 mg/l
• Plomb , Note 2	<0,5 mg/l
• Nickel	<0,5 mg/l
• Etain , Note 3	<0,5 mg/l
• Zinc	<0,5 mg/l
• Phénol	<1,0 mg/l
• Acide borique	2 à 4 mg/l
• pH	6,5 à 9
• Huile minérale	<20 mg/l

Note 1 – Pour le secteur du fil de silionne, ce chiffre est de 200 mg/l. En général, la demande chimique en oxygène est assez basse et le niveau d'émission réel, associé à la MTD, dépend parfois des eaux réceptrices. Si celles-ci sont particulièrement sensibles, il faudra peut-être corriger ce chiffre à la baisse.

Note 2 – Pour les installations de gobeletterie, utilisant de grosses quantités de composés de plomb, le chiffre de 1,0 mg/l est actuellement considéré comme le plus approprié. L'objectif de 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> ne semble pas représenter d'obstacles techniques majeurs. Etant donné le temps nécessaire à l'élaboration et à la mise en œuvre des techniques appropriées, ce chiffre sera réalisable.

Note 3 – Pour la production de verre d'emballage, utilisant des dépoussiéreurs hydrauliques, pour le traitement des rejets en aval, un niveau d'émission inférieur à 3 mg/l est plus approprié.

Le déversement, dans une station d'épuration, ou dans une autre installation de traitement hors site, peut également correspondre à la MTD. Si c'est la solution choisie, il convient de vérifier la conformité des installations réceptrices.

### 5.12 Autres déchets

On considère que la prévention, qu'elle soit réalisable ou non, et la minimisation des effluents, par des moyens primaires sont des MTD.

Lorsqu'il est réalisable, le recyclage du calcin, ou d'autres déchets industriels, dans le circuit de fabrication est une MTD. Les matières fines à recycler, dans une cubilot nécessitent souvent un traitement comme le briquetage. Dans le secteur du fil de silionne, le recyclage des effluents industriels s'est avéré difficile et de nouvelles recherches sont recommandées.

On considère que le recyclage, dans le circuit de fabrication des particules recueillies dans les effluents gazeux, lorsqu'il est réalisable, est une MTD, à l'exception des déchets issus des régénérateurs. Dans la plupart des opérations de fusion, où des dispositifs de captage à sec sont installés, il suffit d'une simple adaptation de la formule de la charge, pour tenir compte de la composition des matières recueillies. Les difficultés, associées au recyclage des matières recueillies par les systèmes d'épuration à sec, sont examinées dans le Chapitre 4. Dans certains cas, il faut arriver à un compromis entre obtenir les valeurs mentionnées, pour les émissions atmosphériques, et minimiser la production d'effluents solides. Lorsqu'une telle situation se présente, elle doit être analysée, en fonction de l'installation et des priorités relatives visant à réduire les émissions dans l'environnement, en général.

Lorsque la situation le permet, on considère que l'utilisation optimisée du calcin et des déchets recyclés, tant internes qu'externes, est une mesure complémentaire à la MTD, si on constate :

- une réduction des déchets, uniquement sur le site
- une amélioration générale du rendement énergétique

- une réduction de certaines autres émissions
- une diminution de la consommation de ressources naturelles





## 6 LES NOUVELLES TECHNIQUES

Les produits et les applications de l'industrie du verre peuvent être très innovants, notamment dans les secteurs de production limitée et haut de gamme. Les innovations, dans les opérations de fusion, ont tendance à être plus progressives, et reposent parfois sur l'adaptation de concepts existants. Les investissements, dans des fours de verrerie, sont importants, et il est difficile d'apporter des modifications, avant la réfection suivante. En cas de problèmes, au cours d'une campagne, la durée d'interruption de la fabrication et les réparations, représentent parfois un coût très élevé, en particulier s'il faut laisser refroidir le four. Les modifications de grande envergure comportent donc de gros risques et les entreprises doivent être sûres des performances, avant de mettre en place une technologie et des concepts nouveaux. De la même manière, les résultats d'une nouvelle technologie ne peuvent être parfaitement évalués qu'après une campagne complète.

La pression de plus en plus forte, pour améliorer les mesures de défense de l'environnement, s'est avérée avoir un puissant effet tonique, pour dynamiser l'innovation, en particulier pour mettre au point des solutions permettant de remplacer les équipements classiques de réduction des polluants secondaires, qui sont parfois très coûteux. Par exemple :

- Le procédé 3R a été élaboré à partir du principe de la réduction chimique par le combustible, qui est traditionnellement utilisé dans les grosses installations de combustion. Bien que basé sur l'adaptation d'un principe existant, il a nécessité de longs travaux de recherche et d'importantes innovations, avant de pouvoir être appliqué aux fours de verrerie.
- Le système FENIX est une optimisation des conditions de combustion dans le four, reposant sur l'adaptation du brûleur et une connaissance approfondie des facteurs, intervenant dans la formation des NOx et de leur mode d'action dans l'environnement du four.
- Les brûleurs, à faible émission de NOx, qui ont été mis au point à l'origine pour d'autres applications, ont été modifiés spécialement pour les fours de verrerie.
- Le fondoir à verre Sorg à faible émission de NOx est le nouveau modèle innovant d'un four de verrerie classique, permettant de minimiser la production des Nox, et d'optimiser la récupération de chaleur.

Aucune avancée technologique majeure n'est envisagée à moyen terme. Mais un certain nombre de techniques font l'objet d'une recherche permanente, visant à optimiser leurs avantages, afin de les rendre plus intéressantes pour l'industrie, dans le long terme. Des concepts complètement nouveaux sont également en cours de développement, mais ils ne devraient pas trouver d'application dans l'industrie dans un avenir proche.

Ce chapitre présente brièvement les techniques disponibles, qui ne peuvent pas être considérées comme des techniques nouvelles, mais qui sont susceptibles de faire l'objet de nouvelles recherches, paragraphes 6.1 à 6.6, ainsi que les techniques à long terme plus innovante qui sont encore au stade des essais.

### 6.1 Brûleur à faible émission de NOx

De nouveaux brûleurs sont toujours à l'étude et d'autres progrès sont attendus. L'application de ces nouveaux brûleurs, associés à des méthodes perfectionnées de régulation de la combustion, faisant appel à des procédés analytiques des gaz brûlés, devrait permettre de réduire encore davantage la production de Nox. Par ailleurs, les fours sont aujourd'hui construits de façon à optimiser leur géométrie et incorporer les nouveaux systèmes de combustion. Il faut cependant

examiner certaines questions technologiques, dans le cadre de la poursuite des recherches, par exemple :

- Lorsque les parties réductrices des flammes touchent les réfractaires de la chambre de combustion, il existe un risque potentiel de détérioration de ceux-ci.
- Les conditions de réduction, au-dessus de la fonte ou de la couverture de composition, peuvent altérer la qualité du verre, et provoquer une décomposition prématurée des sulfates. Il faut alors ajouter des sulfates supplémentaires, afin d'assurer un affinage complet, ce qui peut entraîner une augmentation des émissions de Sox.

### 6.2 Fusion à l'oxygène

Il ne s'agit pas d'une technique nouvelle à proprement parler. Elle est décrite en détail au Chapitre 4. Elle fait néanmoins toujours l'objet d'études, même dans les secteurs où elle est parfaitement établie. Presque tous les premiers fours, à échelle industrielle, ont moins de dix ans. Les plus récents intègrent des modifications qui tiennent compte des dernières connaissances. Les brûleurs ont également fait l'objet de recherches, pour appliquer les bénéfices de la technique de faible émission de Nox.

Les installations existantes fonctionnent toujours avec un four classique, à brûleurs latéraux de type récupération. Avec l'application de techniques de modélisation mathématique et le développement de l'expérience, de nouvelles découvertes sont probables, avec cette technique, notamment en ce qui concerne la géométrie des fours. Par ailleurs, avec le temps, les applications techniques les mieux adaptées apparaîtront plus clairement, ainsi que dans quelles applications on pourra en tirer le meilleur avantage. Comme souligné dans le Chapitre 4, un autre domaine de développement potentiel est l'utilisation des systèmes de récupération de chaleur, avec la fusion à l'oxygène.

### 6.3 Préchauffage du calcin et de la composition

Les principaux exemples de ces techniques sont décrits au Chapitre 4 et, là aussi, ne sont pas considérés comme des techniques émergentes, mais font l'objet d'importantes études. On prévoit que l'utilisation de ces techniques va se généraliser avec la résolution des problèmes de fonctionnement et le gain d'expérience. De nombreux secteurs travaillent sur des projets permettant d'augmenter l'utilisation des déchets de consommation et de traitement secondaire. Si ces recherches se poursuivent comme prévu, l'applicabilité de ces techniques sera élargie.

### 6.4 Formulation des compositions

On observe actuellement un certain nombre de progrès intéressants, dans le domaine de la formulation des compositions, qui sont résumés ci-dessous :

Comme souligné au Paragraphe 4.4.1.1, les formulations de verre qui permettent de réduire, en association avec d'autres techniques, les émissions de poussières, font l'objet de recherche dans les secteurs du verre sodocalcique. Des niveaux d'émission compris entre 70 et 100 mg/m<sup>3</sup> pourraient être possibles dans de nombreuses applications.

En Allemagne et aux Pays-Bas, des projets de recherche ont été lancés, pour le développement de nouvelles matières premières à base de sélénium, avec une volatilité réduite et un meilleur pouvoir de décoloration. L'application de ces nouvelles matières premières de sélénium permettraient de limiter à l'avenir les émissions de sélénium, dans la production de vaisselle et de verre flint. Aucune autre information n'est actuellement disponible.

Une nouvelle composition, pour le fil de silionne, a été mise au point par un fabricant. Cette composition répond à deux éléments principaux, des émissions atmosphériques typiques de la fusion du verre "E", à savoir les particules et les fluorures. Elle ne contient pas de bore ni de fluor ajouté. La réduction des émissions de fluorures est due au fait, qu'en l'absence de fluor ajouté dans la composition, elles sont limitées aux traces de fluorures présentes dans les matières premières, ce qui se traduit par des émissions de fluorures inférieures à  $50 \text{ mg/m}^3$ . Le mécanisme de formation des particules, dans les formules standard de verre "E", est régi par la volatilisation des espèces borées. Plus de 85 % des matières particulaires, issues du four, sont relatives à du bore et l'élimination, des espèces borées, se traduit par une réduction substantielle de la production des particules à moins de  $50 \text{ mg/m}^3$  en général.

L'élimination du bore et du fluorure ajouté rend ce verre plus difficile à fondre, température de fusion plus élevée, et à fibrer et peut entraîner une augmentation des besoins énergétiques. Des connaissances plus approfondies sont nécessaires, pour déterminer la résistance à long terme des réfractaires du four. La mise en œuvre de cette formule de verre requiert également d'évaluer les divers types de produits, et d'apporter des modifications aux opérations de fusion et de formage. Elle est toutefois considérée comme une méthode prometteuse, pour réaliser d'importantes réductions d'émission, par des moyens primaires. Cette technique a été mise au point par une société privée. Elle est protégée par des brevets et n'est donc pas disponible à grande échelle dans le secteur.

## 6.5 Intégration des procédés de fabrication de fritte

Une technique a été brevetée en Espagne. Elle met en œuvre la conception d'installations de fritte, à plusieurs fours, sur un mode modulaire, pour regrouper des opérations similaires. Cette méthode permet d'utiliser des récupérateurs, pour préchauffer l'air de combustion, et de réaliser des économies sur les opérations de dépoussiérage et de recyclage.

## 6.6 Recirculation des gaz de fumée

Les effluents gazeux issus du four pourraient, en principe, être réinjectés dans la flamme, pour réduire la teneur en oxygène et donc la température et l'efficacité de la formation de Nox. Ce type de procédé est largement utilisé dans la technologie de combustion, et plus récemment dans la métallurgie. Pour la verrerie, il semble qu'il soulève quelques difficultés, concernant la stabilité de la flamme, l'efficacité de la combustion, ainsi que des émissions de CO, d'hydrocarbures non brûlés et de déchets solides. La stabilité des réfractaires dans les empilages pourrait également être une source de problèmes, pour l'application aux fours régénératifs. Des résultats encourageants ont été obtenus en laboratoire et dans un four pilote. Mais des difficultés ont été rencontrées, pour l'application de cette technique, à l'échelle industrielle. Il semble qu'une recherche plus poussée soit encore nécessaire, pour évaluer pleinement le potentiel de cette technologie.

Le concept récent d'"air synthétique", basé sur l'association de la recirculation des gaz de fumée, et de l'utilisation du chauffage par oxygène, est également une technique émergente, qui peut avoir une grande utilité. Au moment de la rédaction de ce document, aucune expérience pratique n'a été réalisée avec ce procédé.

## 6.7 Programme de recherche Glasulin

Il s'agit d'un projet conjoint entre 17 sociétés de verrerie et 4 instituts de recherche, dont l'objectif est de développer de nouvelles méthodes de réduction des teneurs en sulfates, dans la composition. Ces travaux nécessitent d'utiliser des capteurs de soufre, de mieux comprendre le procédé d'affinage des sulfates et de contrôler l'état du rédox, qui permet de réduire la quantité

de sulfates ajoutés, tout en maintenant la performance d'affinage recherchée. La réduction des émissions de  $\text{SO}_2$ , qui peut être obtenue en contrôlant l'ajout de sulfates et l'état du rédox, dépend en grande partie, de la qualité du calcin et de son pourcentage dans la composition, de la qualité recherchée pour le verre et du type de combustible utilisé. Dans certains cas, les émissions de  $\text{SO}_2$  pourraient être réduites jusqu'à 30 à 40 %.

On ajoute souvent des nitrates, dans les opérations de fusion du verre, en utilisant des oxydes d'antimoine ou d'arsenic comme agents d'affinage. Les nitrates, comme oxydants, sont également ajoutés aux compositions, qui contiennent des résidus ou d'autres matières recyclées, riches en éléments organiques. Les nitrates oxydent les composés organiques, dans la couverture de composition, entre 500 et 900°C. De nouvelles recherches sont nécessaires, pour optimiser l'état du rédox, sans utiliser une trop grande quantité de nitrates. Certaines sociétés ont mis au point des techniques d'incinération ou de pyrolyse, pour brûler les composants organiques, avant de recycler le résidu interne, déchets de laine ou de fibres, dans le fondoir à verre, ce qui permet de limiter la quantité de nitrates nécessaires.

## 6.8 Nouveaux modèles de fondoir à verre

### 6.8.1 Le fondoir à verre Seg

Le concept de la fusion segmentée cherche à capitaliser, sur les différentes spécifications de fusion des deux matières premières principales utilisées dans la fabrication du verre d'emballage, la composition et le calcin. La composition pure est fondue à environ 1400°C, avec un temps de séjour de 24 heures, alors que pour le calcin la température de fusion n'est que de 1100°C et le temps de séjour de 1 à 2 heures.

La composition est chargée, dans un four de préfusion entièrement électrique, capable de convertir 75 % de la matière première en verre. La composition préalablement fondue est ensuite acheminée, par une gorge, dans un laboratoire évasé, où est ajouté le calcin qui est constitué d'au moins 60 % de matière première. Le mélange composition/calcin passe ensuite dans la seconde chambre de fusion. Celle-ci est chauffée au gaz ou au fioul. Elle est équipée de brûleurs oxycombustion et la hauteur de verre est inférieure à celle de la section de préfusion.

Le système peut offrir un certain nombre d'avantages :

- Les émissions, pendant la phase de préfusion entièrement électrique, sont pratiquement éliminées.
- La consommation de combustible, dans la seconde chambre de fusion, est inférieure, car le calcin fond à une température plus basse que celle de la composition.
- L'utilisation de brûleurs oxycombustion permet de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$ , provenant de la seconde chambre de fusion.
- La dimension de la seconde chambre de fusion peut être plus petite, car le temps de séjour est moins important.

Pour un four de 230 tonnes/jour, converti en bassin Seg, le rendement thermique est supérieur de plus de 25 %, à celui obtenu dans la fusion traditionnelle. Les contraintes de maintenance sont cependant plus importantes. Une campagne complète a été estimée à 15 ans. Mais la section électrique, du fondoir à verre Seg, devrait nécessiter un entretien tous les trois ans environ, la section chauffée au combustible continuant à fonctionner à charge réduite. [tm5 EEO]

### 6.8.2 Fondoir à verre de conception avancée

Le fondoir à verre de conception avancée, AGM, en cours d'élaboration, fait appel à un concept totalement différent, pour le préchauffage et la fusion de la composition. Les matières premières sont injectées, dans la zone de réaction de la flamme, dans une chambre de combustion, chauffée au gaz naturel. Un chauffage rapide se produit, lorsque les matières sont en suspension, puis les produits de combustion et les matières de composition chauffées, sont déversées au moyen d'une lance haute pression, dans la chambre de fusion et sur une "pièce centrale", à partir de laquelle le verre fondu s'écoule dans un réservoir. La température de la flamme étant réduite, par la présence de la composition dans la flamme, un des principaux atouts de ce système est la possibilité de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$ .

### 6.8.3 Le fondoir à verre au plasma

Le British Glass Research Group met au point actuellement un procédé de fusion rapide, qui exploite la conductivité électrique du verre fondu. Le système est équipé de trois torches à arc électrique, situées à  $120^\circ$  les unes des autres. Elles sont alimentées par de l'argon de grande pureté qui est ionisé et éjecté des buses, sous forme d'un jet de plasma basse température. Un creuset isolant, contenant le verre fondu, est situé sous les torches. La composition ou le calcin sont versés par le haut dans ce bain de fusion, et le verre fondu est extrait en continu par la base.

Le dispositif sert de bassin de préfusion ou de bassin final. La préfusion sur le calcin non-conducteur, ou la composition, est réalisée lorsque les torches sont amenées à proximité immédiate. Le courant passe d'une torche à l'autre, par le biais du jet de plasma ionisé. La chaleur de convection du gaz en expansion et la chaleur par rayonnement se conjuguent de façon à constituer un groupe de verre fondu. En mode de fusion finale, les torches sont positionnées de sorte que le courant de plasma s'écoule d'une torche à l'autre, par le verre fondu. La résistance du verre est suffisamment basse à ces températures élevées pour permettre ce mode de fonctionnement.

Le système peut offrir un certain nombre d'avantages :

- la composition et le calcin peuvent être fondus en quelques minutes et produire un verre partiellement affiné
- le four peut être allumé et éteint à volonté
- la composition et la couleur du verre peuvent être modifiées très rapidement
- l'opération n'est pratiquement pas polluante – les émissions de  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  et de poussières sont négligeables

Ce type de fusion pourrait être disponible pour de très petits volumes, dans les prochaines années. Il ne semble pas qu'elle puisse être une technique viable, pour fondre plus de 20 tonnes par jour dans un proche avenir.

## 7 CONCLUSIONS

Ce chapitre présente les conclusions et recommandations, dans le cadre de l'échange d'information sur les meilleures techniques disponibles dans l'industrie du verre. Il ne porte pas sur les conclusions concernant la MTD, qui sont données au Chapitre 5.

### 7.1 Echange d'information

Le travail d'élaboration de ce document a commencé en janvier 1998, avec la préparation de dossiers, présentant les propositions de cadre de l'étude et les sujets clés. La première réunion du Groupe de Travail Technique, le "coup d'envoi", s'est tenue les 29 et 30 janvier 1998. Au cours de cette réunion, un accord a été trouvé, sur la structure du document, le cadre de l'étude et la méthodologie de base, pour l'échange d'information. Les sujets clés relatifs à l'environnement et les priorités de l'étude, ont été identifiés et diverses propositions ont été faites, par les Etats membres et l'industrie.

La période entre janvier et octobre 1998 a été consacrée au recueil des informations, pour les chapitres 1 à 4, et à une première rédaction des chapitres 1 à 3. L'échange d'information à ce stade consistait principalement en visites sur site et en réunions des sous-groupes du Groupe de Travail Technique, GTT. En novembre 1998, une première version du document portant sur les chapitres 1 à 3, a été éditée pour consultation. Pendant la période de novembre 1998 à février 1999, de nouvelles informations ont été recueillies, et la première version complète du document a été finalisée, en incluant les commentaires sur les chapitres 1 à 3. La consultation sur cette première version s'est tenue de mars à avril. Les réponses ont été examinées par le EIPPCB, et une deuxième version complète a été éditée en septembre 1999, pour étude avant la seconde réunion du GTT.

De nombreuses informations ont été communiquées, par la plupart des secteurs de l'industrie et par les Etats membres, notamment les Pays-Bas, la France, l'Allemagne, l'Italie et l'Autriche. Les informations, concernant la fritte et la fibre céramique, ont été communiquées plus tard, dans le projet, et étaient en général moins détaillées. La majorité des informations sur la fritte ont été fournies par l'industrie espagnole.

Les informations ont été validées par des visites sur site, une consultation avec les membres du GTT et un examen minutieux au sein de l'EIPPCB. D'une manière générale, les renseignements fournis étaient de très grande qualité et ont été approfondis au fur et à mesure que progressait l'échange d'information. Néanmoins, un certain nombre de lacunes subsistent et certains domaines gagneraient à être plus détaillés. Ces questions sont présentées au Paragraphe 7.3 ci-dessous.

La deuxième réunion du GTT s'est tenue du 17 au 19 novembre 1999. De nombreuses questions, mais en particulier celles portant sur le Chapitre 5, ont été abordées et un large consensus a été recueilli. Quelques questions importantes ont été examinées de manière plus approfondie, par plusieurs groupes de travail, ayant reçu mandat du GTT principal, pour arriver à un accord sur les autres questions du Chapitre 5. Les résultats de ces groupes de travail ont été incorporés, au document révisé, et il ne reste aucun point important pour lequel le GTT n'aurait pas recueilli un consensus.

### 7.2 Conclusions générales

L'échange d'information, sur les meilleures techniques disponibles dans l'industrie du verre, a été très positif d'une manière générale, et un large consensus a été recueilli, après la seconde réunion du GTT. De nombreux renseignements ont été communiqués et on a pu constater une large participation de la plupart des secteurs de l'industrie et des Etats membres. Le GTT a



organisé un forum d'experts reconnus, pour leur permettre d'échanger leurs points de vue, des informations et de débattre des problèmes, dans un climat impartial.

Dès le début de ce projet, il est apparu clairement que l'industrie du verre, telle que définie par les Paragraphes 3.3 et 3.4 de l'Annexe 1 de la Directive, était extrêmement diverse, tant en termes de dimensions qu'en termes de technologies mises en œuvre. Une des principales conclusions est qu'en raison de cette diversité, il est souvent inapproprié de présenter toutes les techniques particulières, appliquées comme MTD, à tous les procédés et à tous les secteurs. La démarche générale de ce document est de déterminer les niveaux de performance qui sont une indication de l'utilisation des MTD, puis de répertorier les techniques les plus susceptibles d'être appropriées, à un secteur donné. Tout au long du Chapitre 5, il est établi que le moyen le plus approprié, d'atteindre ces niveaux de performance, peut varier d'un procédé à un autre.

De bons résultats ont été obtenus, ces dernières années, dans l'amélioration des performances de l'industrie, en matière de protection de l'environnement. Cette tendance se poursuit et de nouveaux progrès sont attendus. Comme l'explique le Chapitre 6, on attend surtout les améliorations que pourraient apporter de nouveaux développements des techniques primaires et des techniques secondaires plus traditionnelles, plutôt que d'une technologie entièrement nouvelle.

Les exigences et les normes, en matière de protection de l'environnement, étant de plus en plus rigoureuses, l'industrie risque d'avoir à payer un coût élevé, pour la mise en conformité. Cette situation encourage l'industrie à mettre au point des méthodes plus rentables, pour atteindre ces niveaux de performance, et l'industrie du verre à surmonter les difficultés, avec des résultats satisfaisants. Les techniques les plus rentables sont souvent les techniques primaires, qui évitent l'émission de polluants, et non le traitement des substances rejetées. Si on considère l'impact global sur l'environnement, les techniques primaires sont en général préférables, lorsqu'elles permettent d'obtenir des niveaux d'émission équivalents. On a constaté de très bons résultats avec des techniques primaires, y compris le chauffage oxycombustion, pour lutter contre les émissions de Nox. Toutefois, pour les émissions de particules, les techniques primaires ne se sont pas avérées capables en général d'atteindre des niveaux d'émission comparables à ceux des techniques secondaires.

### **7.3 Recommandations pour la poursuite de l'étude**

Comme cela a été souligné plus haut, la qualité des renseignements fournis est en général excellente mais, dans un certain nombre de domaines, des informations complémentaires seraient utiles, pour affiner la définition de la MTD. L'objectif de ce projet est de coordonner l'échange d'information sur la MTD et d'en faire la synthèse. Il n'entre pas, dans le cadre de ces travaux, d'effectuer de nouvelles recherches, pour combler les lacunes. Dans certains cas, cependant, l'EIPPCB ou des membres du GTT, ont corrigé ou regroupé de nouvelles informations. Les domaines où des travaux plus approfondis sont nécessaires et qui doivent être réétudiés, lors de la révision de ce document, font l'objet de recommandations, présentées ci-dessous.

Des études complémentaires permettraient de mieux comprendre les problèmes qui concernent la pollution croisée d'autres milieux. En particulier, il serait utile de mettre au point une méthodologie, permettant d'évaluer les effets relatifs sur l'ensemble de l'environnement, causés par des rejets, dans différents milieux. Par exemple, un aspect important, pour certaines installations, est l'éventuel conflit de priorités, pour la minimalisation des déchets et la réduction des émissions de SO<sub>2</sub>, dans l'atmosphère, lorsqu'un système d'épuration par voie sèche ou semi-sèche pourrait être utilisé, mais que le potentiel de recyclage interne des matières recueillies est limité.

Il serait tout aussi important d'élaborer une méthodologie, pour évaluer les effets relatifs des émissions de différentes substances, dans un même milieu. Par exemple, le passage du chauffage au fioul au chauffage au gaz, permettrait de réduire les émissions de SO<sub>2</sub>, mais pourrait, dans certains cas, occasionner des rejets de NOx légèrement plus élevés, et augmenter la consommation de combustible. On note aussi le risque, en réduisant les taux excessifs d'oxygène, pour réduire la formation de NOx, de modifier l'état du rédox du verre, ce qui entraînerait des émissions de SO<sub>2</sub> plus élevées.

Une autre complication de la définition de la MTD, peut être l'évaluation de l'impact des activités, hors site sur l'environnement. Par exemple, la fusion électrique permet de réduire sensiblement les rejets du four. Toutefois, une évaluation de l'impact sur l'environnement, de la production et de la distribution de l'électricité, par rapport à la réduction d'émission, serait utile pour choisir l'option qui apporte la meilleure protection pour l'environnement, dans son ensemble.

Une analyse plus détaillée des coûts financiers, des diverses techniques, serait utile au moment de la révision de ce document. Une grande partie des informations financières, présentées au Chapitre 4, sont données à titre indicatif. Cette situation est inévitable, étant donné la diversité des installations considérées, le caractère délicat des données financières, pour une entreprise commerciale et, dans de nombreux cas, la rareté des exemples disponibles. Le professeur Beerkens du TNO a préparé un rapport pour l'EIPPCB [tm32 Beerkens] qui résume les informations disponibles et une grande partie des données financières sont basées sur ce rapport. Une amélioration possible serait d'utiliser une série d'études de cas, pour comparer le coût et l'efficacité de diverses options, dans une installation donnée. Cela permettrait peut-être de surmonter certaines des difficultés, liées à la comparaison de coûts, parmi différentes installations, mais nécessiterait des informations qui ne sont pas disponibles actuellement.

D'autres travaux seraient utiles, pour évaluer les techniques à prendre en compte, pour définir la MTD, pour les émissions aqueuses, et pour la consommation d'énergie. Les moyens et le temps étant limités, ces aspects n'ont pas été examinés en détail, comme l'ont été d'autres questions dans le Document de Référence.

Certaines techniques, examinées dans ce document, étaient en cours d'élaboration, et un complément d'information devrait être disponible, dans les prochaines années. Une révision de cette étude devrait tenir compte de ces nouvelles données et examiner dans quelle mesure des informations complémentaires peuvent influencer sur les conclusions de ce document.

L'application du chauffage oxycombustion n'en est qu'à ses débuts et même si un bon nombre de problèmes techniques ont été résolus, il reste des questions qui ne peuvent être examinées qu'avec des informations sur l'utilisation à long terme de la technique. En particulier, avec une meilleure expérience, on pourra évaluer l'effet du chauffage oxycombustion sur la durée de vie des réfractaires. Cet aspect est important pour la viabilité économique de la technique, dans certains secteurs, et représente actuellement un élément de risque financier, qui dissuade les opérateurs d'appliquer la technique. De plus, les coûts directs de la technique doivent être réévalués, en particulier par rapport à l'équilibre entre économies d'énergie et coût de l'oxygène. Ce paramètre peut être un point déterminant, dans l'attrait économique de la technique, et aujourd'hui la situation varie énormément d'un pays européen à un autre.

Par ailleurs, pour un certain nombre d'autres techniques, certains éléments ne sont pas démontrés ou sont contestés, soit pour l'ensemble de l'industrie, soit pour certaines applications. Par exemple, la SCR, la SNCR, le polissage au feu et le préchauffage composition/calcin. Les découvertes, dans ces domaines, devront également être analysées, lorsqu'une plus grande expérience aura été acquise.

Pour les secteurs de la gobeletterie et du fil de silionne, il a été difficile d'établir des conclusions définitives sur la MTD, pour les émissions de Nox. Lorsque ce document sera revu, un bilan

pourra être fait de la situation, pour ces secteurs, et des progrès réalisés avec les techniques proposées.

Il est recommandé de réviser ce document dans quatre ans.



## 8 ANNEXE I : EXEMPLE DE VALEURS D'EMISSION

Ces informations complètent les données présentées au Chapitre 3. Ces usines sont des exemples concrets et les données correspondent à des rejets réels mesurés. La plupart des chiffres concernent 1997. Les exemples fournis sont représentatifs ou typiques de l'ensemble de l'Union européenne. Mais ne constituent **en aucun cas** une indication de la MTD. La majorité des fours, à combustible fossile, sont équipés de systèmes de boosting électrique.

### 8.1 Verre d'emballage

Les données présentées concernent en général un seul four, dans chaque installation. La plupart des usines, de verre d'emballage, possèdent deux fours ou plus. Les dispositifs de réduction des polluants sont généralement communs à plus d'un four, dans ce cas, exemple CG6, les valeurs d'émission sont également communes aux autres fours.

Four	Type de four	Combustible	Capacité (t/j)	Calcin (%)	Techniques de réduction des polluants / Observations
CG 1	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz	370	72	Préchauffeur calcin/composition, mesures primaires contre les NOx, précipitateur électrostatique
CG 2	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz	370	28	
CG 3	Brûleurs transversaux Régénératifs	Fioul	400	50	Brûleurs à faible émission de NOx Passage prévu à FO à faible teneur en soufre
CG 4	Boucle régénération	Fioul	70	41	Verre flint haute qualité pour la parfumerie
CG 5	Boucle régénération	Gaz	244	10	Passage récent au chauffage au gaz naturel
CG 6	Boucle régénération	Fioul	300	80	Tour d'absorption des gaz acides, Précipitateur électrostatique, chaudière de récupération, système commun avec un autre four
CG 7	Four à unités oxycombustion	Gaz	80	38	Verre borosilicaté pour la pharmacie Pas de sulfate dans la composition Précipitateur électrostatique
CG 8	Récupération	Gaz	400	N/C	Mesures primaires – brûleurs à faible émission de NOx
CG 9	Four à unités oxycombustion	Gaz	350	65	Filtre à manches et chaudière de récupération
CG 10	Four à unités oxycombustion	Gaz	310	84	Préchauffeur indirect du calcin, filtre à manches et chaudière de récupération

Four	Energie de fusion (GJ/tonne)	Poussière mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)
CG 1	3,49	24 (0,032)	708 (0,955)	402 (0,542)	7,2 (0,010)	ND
CG 2	4,12	127 (0,22)	772 (1,31)	645 (1,10)	NM	NM
CG 3	4,54	169 (0,29)	1080 (1,9)	2640 (4,3)	62 (0,106)	1 (0,002)
CG 4	7,16	175 (0,56)	700 (2,2)	950 (3,0)	NM	NM
CG 5	5,35	160 (0,28)	1528 (2,7)	198 (0,4)	25 (0,045)	2 (0,004)
CG 6	3,94	3 (0,005)	800 (1,25)	1300 (2,04)	11 (0,017)	0,3 (0,0005)
CG 7	5,98	< 5 (< 0,005)	2158 (0,61)	ND	NM	NM
CG 8	5,22	100 (0,22)	360 (0,8)	810 (1,8)	NM	NM
CG 9	3,35	NM	(0,7)	(0,8)	NM	NM
CG 10	3,35	(0,0006)	(0,5)	(0,6)	(0,013)	(0,0007)

ND = < limite de détection

NM = non mesuré

## 8.2 Verre plat

Toutes ces installations sont des fours à verre float,

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
FG 1	Brûleurs transversaux Régénératifs	Fioul (<2 %S)	600	1° NOx, FENIX, données 1998 Chaudière de récupération
FG 2	Brûleurs transversaux Régénératifs	Fioul (2,3 %S)	450	1° NOx Réduction au fioul 2,4 % S
FG 3	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz ou fuel (1 %S)	650	1° NOx, PE + épurateur à sec avec 100 % recyclage poussière Chaudière de récupération
FG 4	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz	600	1° Contrôles
FG 5	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz	810	1° NOx et 3R, seulement 2/6 brûleurs avec 3R, PE + épurateur à sec avec 100 % recyclage poussière Chaudière de récupération
FG 6	Brûleurs transversaux Régénératifs	Gaz	500	SCR, PE + épurateur à sec avec 100 % recyclage poussière
FG 7	Brûleurs transversaux Régénératifs	50/50 gaz et fioul	550	Filtre à manches avec épuration à sec, carbonate de sodium





Four	Energie de fusion GJ/tonne	Poussière mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)
FG 1	5,4	196 (0,43)	510 (1,1)	3381 (7,57)	39 (0,087)	4,8 (0,011)
FG 2	7,74	213 (0,68)	1473 (4,22)	2400 (6,87)	19 (0,062)	0,06 (0,0002)
FG 3	6,16	15 (0,04) moyenne	1300 (2,7) moyenne	830 (2,1)	30 (0,082)	4 (0,011)
FG 4		156 (0,41)	2578 (6,82)	748 (1,98)	<10 (<0,03)	<1 (<0,003)
FG 5		11 (0,024) moyenne	1294 (2,94) <sup>(1)</sup> moyenne	545 (1,24) moyenne	9 (0,02) moyenne	0,4 (0,0008) moyenne
FG 6	6,14	<10 (0,02)	495 (1,12)	295 (0,67)	<5	<1
FG 7	NM	<10 (<0,03)	2200 (6)	200 (0,56)	<30 (<0,08)	<5 (<0,02)

(1) Le procédé 3R n'était en service que dans 2 brûleurs sur 6. Si tous les brûleurs avaient fonctionné avec le procédé 3R, le niveau d'émission aurait été < 500 mg/Nm<sup>3</sup> et < 1,0 kg/tonne de verre fondu.

### 8.3 Fil de silionne

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
CF 1	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>40	Pas de réduction des polluants 2°, composition avec fluorure ajouté
CF 2	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>40	Pas de réduction des polluants 2°, composition avec fluorure ajouté "réduit"
CF 3	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>40	Pas de réduction des polluants 2°, pas d'ajout de fluorure
CF 4	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>75	1° NOx, dépoussiéreur hydraulique avec réactifs alcalins, pas de fluorure ajouté
CF 5	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>40	Pas de réduction des polluants 2°, nouveau brevet, pas de fluorure ni de bore ajouté
CF 6	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>55	1° NOx, PE, pas de fluorure ajouté
CF 7	Brûleurs transversaux Récupération	Gaz	>75	Pas de réduction des polluants 2°, composition avec fluorure ajouté
CF 8	Brûleurs	Gaz	50	PE/Filtre à manches avec

	transversaux Récupération			injection de chaux ?
--	------------------------------	--	--	----------------------

Four	Energie de fusion GJ/tonne	Poussière mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)
CF 1	14,9	158 (1,22)	1009 (7,8)	136 (1,31)	3 (0,03)	123 (0,94)
CF 2	18,2	218 (1,23)	968 (5,5)	133 (0,85)	3 (0,02)	93 (0,53)
CF 3	13	300 (1,2)	1140 (4,6)	56 (0,22)	4 (0,02)	17 (0,07)
CF 4	10,5	20 (0,22)	1100 (12,44)	270 (1,85)	0	0
CF 5	18,2	13 (0,05)	1070 (3,9)	135 (0,5)	5 (0,02)	21 (0,08)
CF 6	8,75	9,5 (0,04)	1350 (6,8)			
CF 7		294 (1,6)	672 (3,52)			258 (1,42)
CF 8	16,2	4,1 (0,02)	1020 (5,0)	620 (3,0)		1,0 (0,0005)

#### 8.4 Gobeletterie

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
DG 1	Four à boucle régénératif	surtout Gaz, éventuellement fioul	165	1° NOx
DG 2	Four à boucle régénératif	Gaz	65	1° NOx
DG 3	Four mixte récupération	Gaz et électricité	30	Filtre à manches
DG 4	Four électrique	Electricité	28	Filtre à manches
DG 5	Four à boucle régénératif Verre sodocalcique extra blanc	Gaz	165	Réduction des polluants primaires NOx, données 1998
DG 6	100 % électrique Verre opale	Electricité	65	Fusion électrique à voûte froide avec filtre à manches et formule optimisée de la composition
DG 7	100 % électrique Cristal au plomb	Electricité	32	Cristal sans plomb, 35 % calcin
DG 8	100 % électrique Verre sodocalcique extra blanc	Electricité	48	Dépoussiéreur hydraulique 405 calcin
DG 9	Récupération	Gaz	34	PE

Four	Energie de fusion GJ/tonne	Poussière mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)
DG 1	4,8	109 (0,23)	2314 (4,9)	186 (0,58)		
DG 2	6,5	171 (0,7)	2087 (8,7)	3,1 (0,01)		
DG 3	9,5	<1,0 (<0,003)	1400 (3,5)			
DG 4	4,1	0,6 (<0,01)				
DG 5	4,96	108 (0,25)	1243 (2,9)	126 (0,29)		
DG 6	3,42	(0,02)	(1,0)	(0,02)		(0,001)
DG 7	3,8	1,7 (0,035)	11 (0,23)	0,36 (0,007)	0,42 (0,008)	0,05 (0,001)
DG 8	3,7	2,3 (0,02)	117 (1,07)	1,3 (0,011)	1,0 (0,009)	0,15 (0,0014)
DG 9		<1,0				

## 8.5 Verres spéciaux

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
SG 1	Brûleurs transversaux Régénératifs Verre pour écran TV	Gaz ou fioul	230	PE et SCR
SG 2	Brûleurs transversaux Régénératifs, Verre pour tube TV	Gaz ou fioul	180	Filtre à manches
SG 3	Brûleurs transversaux Régénératifs, Verre borosilicaté	Gaz jusqu'à 40 % fioul léger	50	Affinage sans sulfate, PE avec injection de chaux, SCR
SG 4	100 % électrique Verre borosilicaté	Electricité	40	Four électrique à voûte froide, affinage au nitrate, filtre à manches, Données 1998
SG 5	Récupération Verre Borosilicaté pour éclairage	Gaz	34	Les émissions de ces deux fours sont regroupées et traitées dans un PE à 4 étages avec SNCR, Réduction des polluants primaire

SG 6	Brûleurs transversaux Régénératifs Verre sodocalcique pour éclairage	Gaz	150	NOx également appliquée à SG 6
SG 7	Brûleurs transversaux Régénératifs Verre à eau	Gaz et fioul 50/50	320	PE et SNCR
SG 8	Brûleurs transversaux Régénératifs Verre pour écran cathodique	Gaz	220	PE et SCR
SG 9	Brûleurs transversaux Oxycombustion Verre pour écrans et tubes cathodiques	Gaz	420	PE et chauffage oxycombustion
SG 10	Brûleurs transversaux Oxycombustion Verre pour tubes cathodiques	Gaz	280	PE, chauffage oxycombustion et SNCR

Four	Energie de fusion GJ/tonne	Poussière mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/tonne)
SG 1	7,7	10 (0,033)	800 (2,7)	70 (0,082)	1 (0,003)	0,6 (0,001)
SG 2	5,8	3 (0,006)	4300 (12)	50 (0,07)	2 (0,009)	0,3 (0,001)
SG 3	17,0	45 (0,47)	900 (9,44)	<1 (<0,01)	1 (0,01)	4,5 (0,05)
SG 4	7,99	10 (0,06)	85 (0,54)	<1 (<0,01)	10 (0,06)	0,5 (0,003)
SG 5	9,55	5 (0,02)	800 (3,33)	50 (0,2)	8 (0,03)	2 (0,01)
SG 6	6,01					
SG 7	1020	10 (0,016)	500 (0,8)	350 à 500 (0,56 à 0,8)	15 (0,02)	-
SG 8	1400 - 1800	<<15 (<<0,06)	360 (1,5)	<10 (<0,04)	<<30 (<<0,1)	<<5 (<<0,02)
SG 9 19 % O <sub>2</sub>	1556 Ecran 1389 Tube	1 (0,003)	1800 (5)	2 (0,005)	0,4 (0,001)	0,4 (0,001)
SG 10 20 % O <sub>2</sub>	1388	0,9 (0,004)	510 (2,08)	3,2 (0,014)	1,6 (0,007)	0,4 (0,002)



## 8.6 Laine minérale

Pour la laine minérale, la plupart des opérations de formage et de cuisson font appel à des jets à impact et à des cyclones en plus des mesures primaires et des techniques de réduction des polluants décrites,

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
GW 1	Bassin oxycombustion	Oxycombustion	82 à 165	PE et oxycombustion pour la fusion, Dépoussiéreur hydraulique pour le refroidissement
GW 2	Fusion électrique	Electricité	165 à 274	Filtre à manches avec recyclage des poussières dans le four, Dépoussiéreur hydraulique pour formage et cuisson. Four avec >70 % calcin étranger
GW 3	Fusion électrique	Electricité	165 à 274	PE sur four, dépoussiéreur à venturi pour cuisson. Pas de calcin étranger
GW 4	Récupération (à boucle)	Gaz	27 à 82	Dépoussiéreur à venturi pour cuisson
GW 5	Récupération	Gaz	82 à 165	PE sur four. PE humide pour formage et cuisson

Four	Particules mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Phénol mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Formal déhyde mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Ammoni ac mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)
GW 1 Fusion Formage/ Cuisson	7,5 (0,004) 15,7(0,078)	102 (0,63)	18 (0,035)	1,2(0,002)	0,2(0,0003)	2,1(0,164)	2 (0,141)	28 (2,16)
GW 2 Fusion Formage/ Cuisson	1 (0,002) 25 (1,5)	30 (2,0)				12 (0,3)	2 (0,1)	60 (3,5)
GW 3 Fusion Formage/ Cuisson	5 (0,02) 41 (2,61)	59 (0,14)			0,01	5,3 (0,34)		87 (5,56)
GW 4 Fusion Formage/ Cuisson	1065 (7,51) 2548 (50)	704 (4,96)	1,5 (0,01)	70 (0,49)	0,8(0,005)	761 (21,7)	89 (1,75)	3046 (68)
GW 5 Fusion Formage/ Cuisson	293 (0,373)	1706 (6,5) 371 (7,7)	0,9(0,004)	19 (0,081)	1 (0,005)	16 (1,114)	4,3(0,306)	43 (3,116)

Four	Type de four	Combustible	Capacité (tonnes/jour)	Techniques de réduction des polluants / Observations
SW 1	Bassin	Gaz naturel	82 à 165	PE avec recyclage poussières dans le four. PE humide pour formage et cuisson
SW 2	Bassin	Electricité		Incinérateur et filtre à manches sur four. Filtre laine de roche pour formage et incinérateur pour cuisson
SW 3	Cubilot	Coke		Cyclone sur four, filtre laine de roche sur formage et cuisson combinés
SW 4	Cubilot	Coke	>165	Incinérateur, filtre à manches et épuration à sec sur four. Filtre pour formage et incinérateur pour cuisson
SW 5	Cubilot	Coke	82 à 165	Incinérateur et filtre à manches sur four, Filtre laine de roche pour formage et incinérateur pour cuisson
SW 6	Cubilot	Coke	82 à 165	Incinérateur et filtre à manches sur four. Filtre laine de roche pour formage et incinérateur pour

				cuisson. Laitier dans la charge
--	--	--	--	---------------------------------

Four	Particules mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	NOx en NO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	SOx en SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	HCl mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	HF mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Phénol mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Formal déhyde mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)	Ammoni ac mg/Nm <sup>3</sup> (kg/t)
SW 1 Fusion Formage/ Cuisson	30 (0,1)	1210 (2,9)	165 (0,3)	1 (0,002)	0,4(0,001)	28 (6,9)		14(0,4)
SW 2 Fusion Formage/ Cuisson	10 (0,002) 10 (0,3)	150 (0,03) 30 (0,15)	3000 (0,6)			30 (0,9) 0,2(0,002)	3 (0,1) 0,4(0,002)	10 (0,002) 10 (0,3)
SW 3 Fusion Formage/ Cuisson	2600 (3,6) 12 (0,4)	300 (0,45) 4 (0,16)	930 (1,4) 2 (0,07)	H <sub>2</sub> S 300 (0,4)		30 (1,1)	3 (0,1)	2600 (3,6) 12 (0,4)
SW 4 Fusion Formage/ Cuisson	6 (0,02) 19,5 (0,5)	159 (0,5) 160 (0,3)	385 (1,4)	15 (0,05)	2 (0,01)	18 (0,4) 7 (0,01)	7 (0,15) 7 (0,01)	6 (0,02) 19,5 (0,5)
SW 5 Fusion Formage/ Cuisson	12,7 (0,02) 14,4(0,3 3) 13,2 (0,02)	169 (0,23) 89 (0,14)	1046 (1,4)		1 (0,001)	5 (0,11) 1 (0,002)	2 (0,05) 1 (0,002)	12,7 (0,02) 14,4(0,33) 13,2 (0,02)
SW 6 Fusion Formage/ Cuisson	57 (0,1) 44,5 (0,8) 14 (0,04)	175 (0,32)	1951 (3,6)	1,9(0,003)	1,1(0,002)	3,3 (0,06) 0,9(0,002)	10,9 (0,2) 2,8(0,005)	57 (0,1) 44,5 (0,8) 14 (0,04)

## 9 ANNEXE II : EXEMPLE DE BILANS SOUFRE DANS LES FOURS INDUSTRIELS

Les Chapitres 4 et 5 font référence à l'emploi des bilans soufrés, pour déterminer les conditions spécifiques à une installation, ou comme base de comparaison entre les diverses options de procédé. Cette annexe présente deux exemples de bilans soufrés et explique les paramètres, liés à ces exemples. Les exemples choisis sont des fours sodocalciques, 1 pour verre plat, 1 pour verre d'emballage, avec recyclage interne complet et partiel des poussières, recueillies dans une unité filtrante, équipée d'un dispositif de lavage des gaz acides. Les chiffres proposés sont uniquement des exemples et, en particulier, les niveaux d'émission, donnés dans les exemples ne doivent pas être considérés comme des indications de la MTD.

Le recyclage total, des poussières filtrées, dépend du type de verre, de son état d'oxydation, de sa capacité à absorber le  $\text{SO}_3$  et, d'une manière plus générale, des conditions d'exploitation du four, en particulier la teneur en soufre dans le combustible. La meilleure façon d'illustrer ces aspects est d'analyser un bilan soufré complet, tel qu'illustré par les chiffres ci-après. Pour un cas spécifique, le débit peut être donné en kg/h d'une unité cohérente,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  ou S, ou sous forme de  $\text{mg/Nm}^3$  de  $\text{SO}_2$ . Car, pour un four donné, il est plus facile de calculer le facteur de conversion, entre concentration et débit massique.

Pour le bilan soufré dans le four, les apports sont :

- Apport de soufre par les matières de la composition
- Apport de soufre par le calcin, interne + externe
- Apport de soufre par le combustible
- Apport de soufre par les poussières filtrées et recyclées

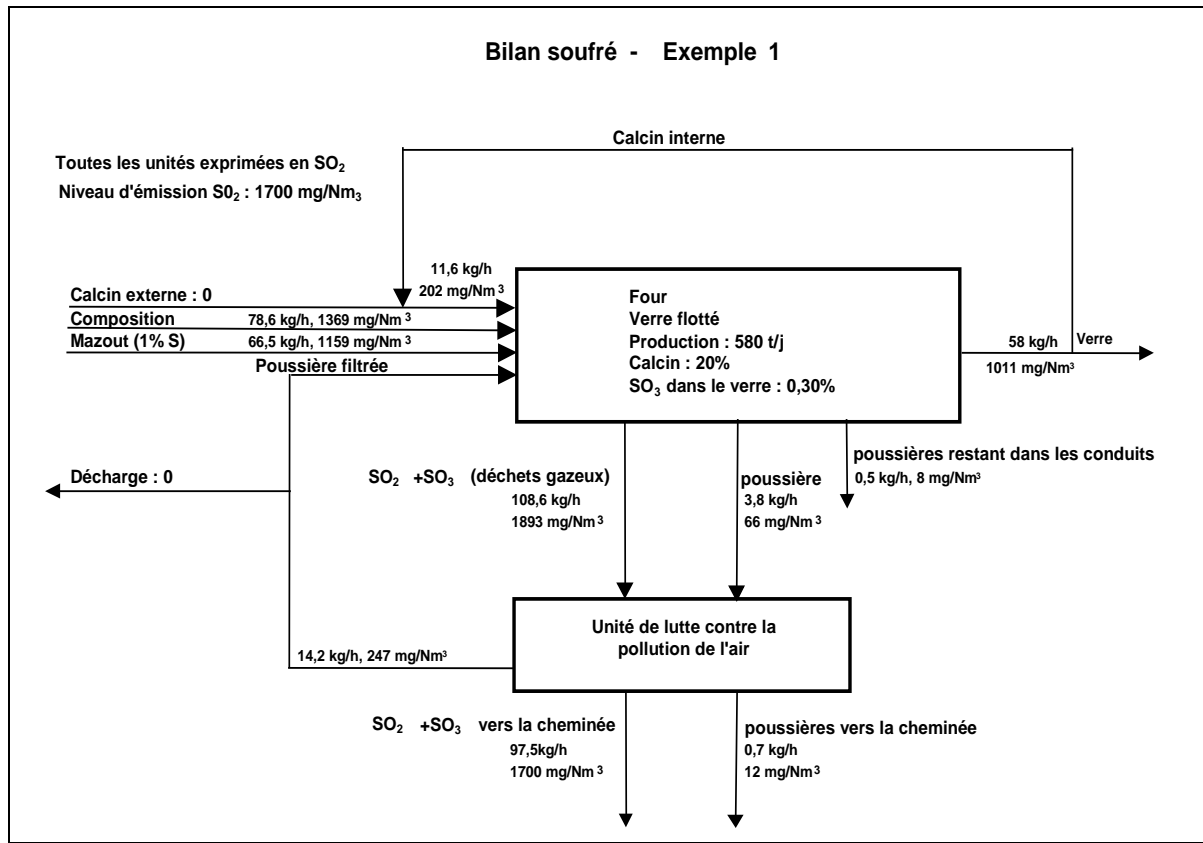
Les sorties sont :

- Soufre dans la production du four
- Soufre dans les gaz brûlés,  $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$
- Soufre contenu dans les poussières
- Soufre dans les dépôts de poussière dans les régénérateurs et les conduits de fumée, estimation : 1 à 5 %.

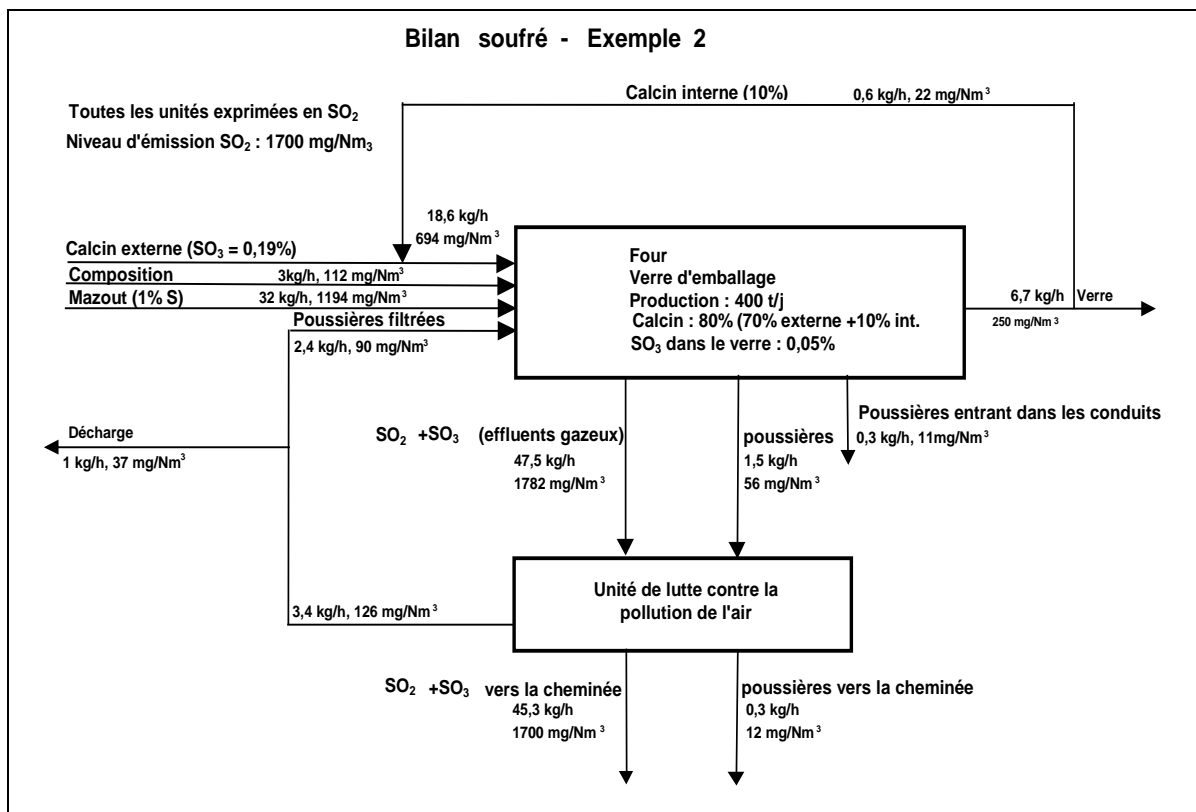
Le bilan soufré global doit inclure le bilan soufré de l'unité de lutte contre la pollution, c'est-à-dire les sorties de la cheminée et les poussières de filtration. Si la quantité de poussières filtrées n'est pas compatible avec le type de verre, un moyen extérieur d'élimination, en général un site d'enfouissement, doit être prévu pour au moins une partie des poussières. Pour minimiser l'élimination des déchets, il est également possible de réduire la teneur en soufre dans le combustible. Cette dernière option est souvent le choix privilégié, tant en termes de protection de l'environnement dans son ensemble, que pour des raisons économiques.

Le recyclage des poussières filtrées implique la substitution du sulfate de sodium ou du gypse dans la composition. La quantité éventuelle de poussières, qui peut être recyclée, dépend de la quantité de sulfates nécessaire pour l'affinage et la possibilité de remplacer ce sulfate par les poussières filtrées. Les propriétés des poussières et la possibilité de recyclage dépendent des conditions d'exploitation et du type d'absorbant, matières de lavage, utilisé. Le recyclage est en général plus difficile avec une injection de chaux, car l'efficacité de la réduction des polluants est moindre et les poussières sont moins oxydées. Les poussières, provenant de l'épuration avec du carbonate ou du bicarbonate de soude, sont souvent plus faciles à recycler.

Le calcin extérieur et sa composition moyenne influencent également l'apport de  $\text{SO}_3$ . Si le four est chauffé au fioul, celui-ci dégage environ  $1200 \text{ mg/Nm}^3$  de  $\text{SO}_2$  pour 1 % de soufre dans le fioul. La quantité de soufre, pouvant être absorbée dans le verre, varie de presque zéro pour certains verres réduits, jusqu'à environ  $500$  à  $700 \text{ mg/Nm}^3$ , pour les verres flint oxydants. Ces chiffres sont donnés à titre indicatif.









## 10 ANNEXE III : CONTROLE DES EMISSIONS

Cette annexe propose des recommandations générales, pour mesurer des émissions provenant des procédés de verrerie, afin d'obtenir des résultats représentatifs et comparables. Un certain nombre de méthodes et de procédures nationales et internationales, peuvent être appliquées, pour mesurer les émissions. Mais elles peuvent donner lieu à des différences importantes, car des méthodes générales ont été appliquées à un cas très spécifique, comme la fabrication du verre.

### 10.1 Principaux polluants

La principale source de pollution, dans la verrerie, est le rejet dans l'atmosphère, dû à l'opération de fusion. Dans certains secteurs toutefois, les activités aval occasionnent, elles aussi, des rejets substantiels. Un résumé des principaux polluants, indiqués pour les secteurs référencés de l'industrie verrière, est donné dans le tableau suivant :

Secteur/Activité	Polluants
<b>Verre d'emballage</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, métaux lourds
Traitement de surface à chaud	Poussières, étain organique et inorganique, HCl, SOx
<b>Verre plat</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, métaux lourds, pour verres colorés
Traitement de surface	SOx
<b>Fil de silionne</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, composés gazeux de bore
Activités aval	Poussières, COV, formaldéhyde, ammoniac, eaux usées
<b>Gobeletterie</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée, métaux lourds
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, métaux lourds
Activités aval	HF, eaux usées, issues du polissage et du doucissage
<b>Verres spéciaux</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée, métaux lourds
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, métaux lourds, composés borés
Activités aval	Poussières, eaux usées, issues du polissage et du doucissage
<b>Laine minérale</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, composés gazeux de bore, H <sub>2</sub> S
Procédés aval	Poussières, COV, phénols, amines, ammoniac, formaldéhyde, COV, NOx, cuisson, eaux usées
<b>Fibre céramique</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée
Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, H <sub>2</sub> S, HF, HCl
Activités aval	Poussières, fibres, eaux usées
<b>Fritte</b>	
Manutention des matières	Poussières, silice cristallisée, métaux lourds

Opération de fusion	Poussières, CO, NOx, SOx, HF, HCl, métaux lourds, composés borés
Activités aval	Poussières, eaux usées

**Tableau 10.1 : Principaux polluants que l'on doit mesurer en verrerie**

## 10.2 Contrôle des émissions

Le contrôle des émissions est utilisé dans le monde entier, pour vérifier la conformité, avec les limites d'émission autorisées. La méthode et la fréquence doivent être fonction de l'étendue des émissions à vérifier et de la technologie de prévention mise en œuvre. Les méthodes les plus souvent utilisées sont les suivantes :

- Contrôle des performances techniques de réduction d'émission, par exemple, chute de pression dans le filtre à manches
- Contrôle continue des émissions
- Mesures ponctuelles des émissions
- Calcul du bilan massique

### Contrôle des performances techniques de réduction des émissions

Il s'agit en général de l'exigence minimum, imposée pour le contrôle des émissions. Dans certains cas, par exemple, une situation stable bien maîtrisée, l'évaluation des performances techniques de réduction des émissions peut être suffisante, pour déterminer la conformité avec les obligations d'une autorisation. On applique souvent des techniques automatiques, permettant de détecter la défaillance ou le mauvais fonctionnement du matériel de réduction des émissions, mesure de la chute de pression, température, pH, etc.

### Mesure continue et/ou discontinue des émissions

Le contrôle des émissions implique de déterminer tous les paramètres utiles, capables d'influencer les mesures des différents polluants ou l'interprétation et la présentation des résultats. Outre les substances réglementées, poussières, NOx, SOx, HCl, HF, etc., il convient de déterminer les paramètres caractéristiques de la source d'émission, par exemple :

- Vitesse et débit massique des gaz de fumée
- Température
- Humidité
- Concentration en oxygène
- Concentration en dioxyde de carbone
- Concentration en monoxyde de carbone

La mesure des émissions peut être influencée par plusieurs facteurs, dont certains sont particulièrement importants, dans le cas de la fusion du verre. Dans la majorité des cas, les paramètres essentiels sont les suivants :

- Température des effluents gazeux
- Répartition des poussières par grosseur
- Vitesse des effluents gazeux
- Teneur en eau des effluents gazeux

- Forme gazeuse ou particulaire des polluants
- Temps d'échantillonnage
- Conditions de référence

### Température des effluents gazeux

La température des effluents gazeux sortant du four peut considérablement varier, de 100 à 850°C, au niveau de la cheminée, en fonction du système de récupération de la chaleur, régénérateurs, récupérateurs ou refroidissement rapide des gaz, et la technique utilisée pour réduire les polluants. Les températures les plus élevées correspondent en général aux fours à récupération et/ou à fusion à l'oxygène. Les températures les plus basses sont caractéristiques des effluents gazeux très dilués, fours discontinus, fusion exclusivement électrique, certains fours équipés de dispositif de réduction des polluants, etc. Les erreurs de mesure possibles, dues à la température des effluents gazeux, peuvent être minimisées de la manière suivante :

- Filtres et sondes appropriés, pour la mesure des poussières, filtres à quartz ou en fibre de verre sans liants organiques, joints d'étanchéité haute température, etc.
- Conditionnement satisfaisant des filtres avant usage à haute température. Une phase de conditionnement préalable jusqu'à 400 à 600°C est recommandée, afin d'éviter d'autres pertes de poids au cours de la mesure.
- Sondes et filtres chauffés, à basses températures, des effluents gazeux, notamment en présence d'une forte humidité, afin d'éviter la condensation d'acides et d'eau.

### Répartition des poussières par grosseur

Le diamètre d'une particule de poussière, provenant de la fusion, est normalement très petit, moins de 1 µm et en général de 0,02 à 0,5 µm. Au cours de l'échantillonnage, les particules s'agglomèrent facilement et, lorsque les matériaux de filtration sont alcalins, ont tendance à réagir avec les substances gazeuses acides, présentes dans les gaz de fumée. Pour éviter ce phénomène, il faut sélectionner des filtres chimiquement inertes, pour l'échantillonnage. Lorsque les matières particulaires sont mesurées en continu, il est parfois difficile d'éliminer les fines particules, des parties optiques du dispositif de mesure, et on peut obtenir des résultats erronés sur la concentration des poussières. Il convient de mettre en place un système de nettoyage adapté.

### Vitesse des effluents gazeux

Bien que les poussières, émises par l'opération de fusion, soient constituées de particules extrêmement fines, les mesures doivent être effectuées par échantillonnage isocinétique. La géométrie des conduits et la position du point de prélèvement doivent être sélectionnées, de façon à permettre une mesure correcte de la vitesse des effluents gazeux.

### Teneur en eau des effluents gazeux

La présence de forts pourcentages d'eau, dans les effluents gazeux, est très fréquente, dans le cas d'une fusion à l'oxygène et de fours air/gaz. Car l'eau est utilisée comme liquide de refroidissement, avant le dispositif de réduction des polluants. Il convient de déterminer le point de rosée du gaz, afin d'éviter la condensation pendant l'échantillonnage. Les polluants gazeux doivent être mesurés, à l'aide de sondes chauffées, chaque fois qu'il y a un risque de condensation, notamment dans les gaz de fumée riches en SO<sub>3</sub>. C'est également le cas pour certains procédés en aval, où sont utilisés des dépoussiéreurs hydrauliques, notamment pour le fil de silionne, la fibre de verre, etc. Lorsqu'il y a condensation d'eau, le liquide obtenu doit être

vérifié, pour déterminer l'absorption éventuelle des polluants gazeux, comme les oxydes de soufre.

### Forme gazeuse et particulaire des émissions

Certains polluants peuvent être rejetés dans l'atmosphère, à la fois sous forme gazeuse et sous forme particulaire. C'est le cas de certaines substances, issues de la fusion, par exemple certains composés borés, notamment l'acide borique, le sélénium, l'arsenic, le mercure, si le calcin utilisé provient de verre d'éclairage, mais également le chlorure d'étain, du traitement de surface à chaud pour le verre d'emballage. L'acide borique est surtout rejeté, dans l'atmosphère, dans sa forme gazeuse, en raison de sa pression de vapeur élevée, et de sa faible température de condensation, inférieure à 160°C. Le sélénium, utilisé pour colorer ou décolorer le verre, peut produire des rejets gazeux importants, en raison de la formation de composés extrêmement volatiles, avec des températures de condensation aussi basses que 60 à 100°C. Dans ce cas, afin d'éviter les erreurs d'évaluation, le train d'échantillonnage doit être équipé d'un dispositif combiné, pour le prélèvement simultané des éléments particuliers et des éléments gazeux.

### Temps d'échantillonnage

Dans le cas des fours régénératifs, outre les procédures standard, qui requièrent un temps approprié, pour le prélèvement d'un échantillon représentatif qui, dans les règles de l'art, doit tenir compte du cycle inversé des régénérateurs. En fait, les rejets de fusion peuvent considérablement varier, en fonction du cycle de température des chambres, qui augmente pendant celui-ci. Pour effectuer des mesures, qui donnent des résultats comparables, le temps d'échantillonnage doit porter sur un nombre égal de cycles de cuisson. Le problème peut également se poser avec les cycles de nettoyage du matériel de réduction des polluants.

### Conditions de référence

Normalement, les valeurs limites d'émission sont données en concentration, à une température de 0°C, à une pression de 101,3 kPa et pour d'autres conditions spécifiques, notamment :

- Fours à fusion continue : 8 % oxygène en volume, sec
- Fours discontinus : 13 % oxygène en volume, sec
- Autres sources d'émission : pas de correction pour l'oxygène ou la vapeur d'eau

En règle générale, pour définir la conformité avec les valeurs limites d'émission, on utilise la concentration de polluants. En effet, elle est mesurée directement et ne nécessite pas l'acquisition d'informations complémentaires, concernant le procédé de fabrication, dont on a généralement besoin pour définir les facteurs d'émission ou les émissions spécifiques, par exemple, kg d'émission par tonne de verre fondu. Toutefois, les valeurs limites d'émission sont parfois données à la fois en concentration, mg/m<sup>3</sup>, et en facteur d'émission, kg/tonne de verre, kg/h, g/h. C'est notamment le cas pour les effluents gazeux très dilués, fours électriques par exemple, et en général en présence de forts pourcentages d'oxygène, oxycombustion. La correction à 8 ou 13 % d'oxygène, donnerait des résultats qui ne seraient pas comparables, avec les fours à combustible fossile ou à air, utilisés pour l'opération de fusion.

### Contrôle continu

La mise en place d'un contrôle continu est souvent limitée aux émissions du fondoir à verre, qui représente le débit massique le plus important, et qui a un niveau relativement constant d'émissions. Le contrôle continu des émissions peut être réalisé par des instruments de mesure "in situ", ou des méthodes extractives. Les mesures "in situ" sont effectuées sur l'ensemble de la



cheminée, à la température des gaz de fumée et à l'humidité du point d'échantillonnage. Les mesures par extraction, sont basées sur le traitement de l'échantillon de gaz brûlés, et la détermination ultérieure de la concentration en polluants, sur gaz sec. Les deux systèmes nécessitent une maintenance rigoureuse et un étalonnage périodique, avec des méthodes de mesure discontinue. En particulier, les mesures pratiquées par des instruments "in situ" peuvent être altérées par la couleur et la répartition des particules par grosseur, qui varient selon les différents verres produits dans le four, vert, marron, semi-incolore, et le type de combustible utilisé.

Les paramètres qui peuvent être mesurés en continu et les méthodes préconisées sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Méthode
Oxygène	Paramagnétique, cellule d'oxyde de zirconium
Poussière	Opacité à la lumière, diffusion de la lumière
Oxyde d'azote, NO	Photométrie infrarouge ou UV, chimiluminescence
Oxydes d'azote, NO + NO <sub>2</sub>	Photométrie infrarouge ou UV, chimiluminescence avec convertisseur, NO <sub>2</sub> en NO
Dioxyde de soufre	Photométrie infrarouge ou UV
Monoxyde de carbone	Photométrie infrarouge
Hydrocarbures totaux	Détecteur à ionisation de flamme

**Tableau 10,2 : Techniques de surveillance continue**

D'autres polluants peuvent être mesurés en continu, notamment le HF par la potentiométrie et le HCl par la photométrie IR ou la potentiométrie. Toutefois, ces mesures ne sont pas faciles à réaliser et il est nécessaire d'étalonner fréquemment les analyseurs. La surveillance continue de ces polluants pourrait être adaptée à des procédés spéciaux, nécessitant l'emploi de composés chlorés ou fluorés dans la composition, et donnant lieu à des rejets, après le dispositif de réduction des polluants.

Dans certains Etats membres, la législation nationale impose la mise en place d'une surveillance continue des rejets, pour des débits massiques supérieurs aux valeurs ci-dessous :

Substance	Débit massique (kg/h)
Poussière	2 à 25
Dioxyde de soufre	50 à 150
Oxydes d'azote, NO <sub>2</sub>	30 à 150
Monoxyde de carbone pour évaluer l'efficacité de la combustion	5
Monoxyde de carbone, tous les autres cas	100
Composés fluorés, HF	0,5
Composés chlorés, HCl	3 à 20

Note : Les fourchettes mentionnées ici sont des exemples de législation allemande et française, la valeur inférieure correspondant aux normes allemandes.

**Tableau 10.3 : Débits massiques pour la surveillance continue (France et Allemagne)**

## Mesures discontinues

Des mesures individuelles peuvent être réalisées en séparant les différents polluants, en général poussières, SO<sub>x</sub>, HCl, HF, métaux, sur des matériaux filtrants adaptés, dans des solutions absorbantes ou à l'aide d'instruments de mesure extractive continue, photométrie IR ou UV pour NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, etc. Le nombre de mesures nécessaires est généralement établi en fonction de la variabilité des rejets et de la durée de l'opération à contrôler. Dans certains cas, l'opération est effectuée dans un délai limité, qui ne permet qu'une seule mesure, manutention des matières premières par exemple. Dans la plupart des cas toutefois, pour un procédé continu caractérisé par des rejets stables, un minimum de trois mesures individuelles est requis et, pour des rejets variables, cinq mesures individuelles. Dans les cas particuliers, jusqu'à 8 à 10 mesures peuvent être nécessaires.

Les méthodes les plus courantes sont données à titre indicatif dans le tableau ci-dessous.

Polluant/Paramètre	Méthode
Poussière	Filtration et analyse gravimétrique
Oxydes d'azote, NO + NO <sub>2</sub>	Photométrie IR ou UV, chimiluminescence. Absorption dans une solution appropriée et analyse chimique colorimétrie, chromatographie par échange d'ions, etc.
Dioxyde de soufre, SO <sub>2</sub>	Photométrie IR ou UV
Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub> + SO <sub>3</sub>	Absorption dans une solution appropriée et analyse chimique, titrage, chromatographie par échange d'ions, plasma inductif.
Oxyde de soufre, SO <sub>3</sub>	Absorption dans une solution appropriée et analyse chimique, titrage, chromatographie par échange d'ions.
Métaux, As, Pb, Cd, Se, Cr, Cu, V, Mn, Ni, Co, Sb, etc.	Filtration et/ou absorption dans une solution appropriée. Analyse par spectroscopie d'absorption atomique ou spectrométrie couplée à un plasma induit
Chlorures, HCl	Filtration et absorption dans une solution appropriée, Analyse par chromatographie par échange d'ions, titrage
Fluorures, HF	Filtration et absorption dans une solution appropriée, Analyse par électrode sélective d'ions, chromatographie par échange d'ions
Sulfure d'hydrogène	Filtration et absorption dans une solution appropriée, Chromatographie par échange d'ions, analyse colorimétrique ou titrage en retour
Formaldéhyde	Absorption dans une solution appropriée, Analyse colorimétrique ou HPLC
Phénol	Absorption dans une solution appropriée, Chromatographie en phase gazeuse, liquide, ou analyse colorimétrique
Ammoniac	Absorption dans une solution appropriée, Chromatographie par échange d'ions, analyse colorimétrique ou par électrode sélective d'ions
Amines	Absorption dans une solution appropriée ou du gel de silice, Chromatographie en phase gazeuse, HPLC ou analyse GC-MS
Composés organiques volatiles	Détecteur à ionisation de flamme
Oxygène	Paramagnétique, cellule à l'oxyde de zirconium
Monoxyde de carbone	Photométrie IR

Dioxyde de carbone	Photométrie IR
--------------------	----------------

Note : Les techniques énumérées sont des exemples qui ne couvrent pas toutes les techniques analytiques qui peuvent être utilisées, pour analyser les différents polluants, dans l'industrie du verre.

#### Tableau 10.4 : Techniques de surveillance discontinue

En général, des méthodes nationales et internationales normalisées, ISO, CEN, VDI, EPA, etc. existent, pour mesurer la plupart des paramètres d'émission. Pour un certain nombre de substances toutefois, il n'existe aucune méthodologie normalisée. C'est le cas pour la plupart des substances organiques, phénol, formaldéhyde, amines, etc., mais aussi pour de nombreux composés inorganiques qui peuvent être rejetés à l'atmosphère sous forme à la fois particulaire et gazeuse, composés borés par exemple. Comme cela a déjà été signalé, les règles de l'art suggèrent de pratiquer un double échantillonnage, filtration et adsorption, permettant d'identifier et de quantifier les différentes fractions.

#### Calcul du bilan massique

Dans certains cas, et pour certains polluants, un calcul du bilan massique peut donner une bonne estimation des rejets atmosphériques. Lorsque l'entrée ou la sortie d'une substance spécifique, dans une étape du procédé, par exemple la fusion, ainsi que d'éventuelles modifications chimiques et/ou physiques, sont connues avec une précision suffisante, on peut utiliser le bilan massique comme méthode quantitative, pour évaluer les rejets atmosphériques. Cela peut être le cas par exemple pour le SO<sub>2</sub> de la fusion, du HF dans la production de verre opale ou du sélénium, dans la production du verre bronze ou du verre flint. On utilise en général le calcul du bilan massique pour établir une comparaison avec le niveau d'émission mesuré.

#### Interprétation et présentation des résultats de mesure

Afin de pouvoir interpréter objectivement les résultats des mesures d'émission, il est important de mentionner au minimum les informations suivantes :

- la méthode de surveillance mise en œuvre
- la précision de la méthode utilisée
- les conditions d'exploitation correspondantes, données de procédé
- les conditions de référence, humidité, température au point de mesure, etc.
- Les résultats de toutes les mesures individuelles ou, dans le cas d'une surveillance continue, la distribution de fréquences de toutes les concentrations moyennes demi-horaires, horaires ou journalières.

#### Conclusions

Cette annexe ne prétend pas donner une méthodologie standard, pour la surveillance des rejets atmosphériques par l'industrie du verre. Le cas échéant, des méthodes démontrées sont normalement disponibles. Mais elles doivent être évaluées pour chaque application. L'objectif de cette annexe est de proposer des informations générales, et d'attirer l'attention sur les risques d'erreur d'évaluation des niveaux d'émission, qui peuvent être obtenus, avec l'application de différentes MTD.



## 11 ANNEXE IV : LEGISLATION NATIONALE

Il s'agit de la législation telle qu'elle a été communiquée, par chaque Etat membre. Aucune modification n'a été apportée aux informations reçues.

### 11.1. Législation du Luxembourg

Valeurs limites d'émission, pour le verre float, en fonction des permis :

Polluant	Usine 2	Unité	Période moyenne
Poussière	50	mg/Nm <sup>3</sup>	moyenne quotidienne
SO <sub>2</sub>	500	mg/Nm <sup>3</sup>	moyenne horaire
NO <sub>x</sub>	500*	mg/Nm <sup>3</sup>	moyenne quotidienne
HCl	30	mg/Nm <sup>3</sup>	moyenne horaire
HF	5	mg/Nm <sup>3</sup>	moyenne horaire

\* valeur limite à respecter après la réfection du four et l'optimisation du procédé 3R.

Conditions de référence :

0°C, 1013 mbars, sec, 8 % O<sub>2</sub>

Périodicité des mesures :

- Poussière et NO<sub>x</sub> : continu
- Toutes les autres substances : une fois par an

### 11.2. Législation et réglementation en vigueur aux Pays-Bas

#### Loi cadre

Les Pays-Bas disposent de deux lois cadres en matière d'environnement, la "Loi sur la Gestion de l'Environnement" et la "Loi sur la Pollution des Eaux de Surface". Ces deux lois constituent le cadre des autorisations d'exploitation et établissent les conditions d'octroi de l'autorisation. Ces textes sont conformes aux exigences de la Directive PCIP, et l'autorisation intégrée est garantie par une procédure coordonnée de délivrance d'une autorisation d'exploitation, par les autorités compétentes.

Ces deux lois cadres régissent un certain nombre de décrets et de réglementations, qui établissent des normes en matière d'activités comportant des risques d'émissions.

#### Réglementations

##### Réglementations néerlandaises en matière d'émission, NeR

Les réglementations néerlandaises en matière d'émission, NeR, ont pour objet les rejets industriels dans l'atmosphère et servent de directives pour la délivrance d'autorisation d'exploitation ou pour la modification des conditions de délivrance. Les NeR doivent être utilisées comme marche à suivre pour l'octroi des autorisations d'exploitation, depuis le 1<sup>er</sup> mai 1992.

Les NeR obéissent au même concept fondamental que les TA-Luft allemandes, sauf que la classification de certaines substances a été adaptée, à la lumière des dernières découvertes toxicologiques. Par ailleurs, les normes d'émission, pour certaines classes de substances, ont été modifiées, dans le cadre des connaissances actuelles sur les meilleures techniques disponibles.

Dans les NeR, les normes de concentration pour différentes substances sont précisées et constituent les limites supérieures, pour des sources ponctuelles distinctes, en fonction du débit

massique. Les “réglementations particulières” concernent les mesures pour limiter les émissions, lors de déversements accidentels ou par des sources diffuses. De plus, les “réglementations particulières” présentent les règlements qui dérogent aux “normes générales d'émission” pour certaines industries ou installations spécifiques.

L'industrie verrière et l'industrie de la laine minérale sont couvertes par une de ces réglementations particulières. La réglementation particulière pour la laine minérale a été publiée en mai 1992. Elle stipule les conditions suivantes :

**“Oxydes de soufre**

Les rejets de dioxyde de soufre des fondoirs à verre doivent être réduits, en fonction de la concentration en SO<sub>2</sub>. Pour les concentrations inférieures à 1500 [mg/Nm<sup>3</sup>], une injection de chaux est une possibilité.

Pour les concentrations supérieures à 1000 [mg/Nm<sup>3</sup>], la conversion en acide sulfurique est à envisager, comme solution alternative. La concentration en SO<sub>2</sub>, dans les rejets d'effluents gazeux, ne doit pas dépasser 400 [mg/m<sup>3</sup>] après traitement.

**Particules :**

L'émission de particules doit être éliminée, par l'utilisation de filtres de tissu ou toute autre technique, grâce à laquelle on peut obtenir une concentration résiduelle comparable.

**Substances organiques :**

Les normes générales des NeR, y compris la règle de cumul, sont applicables aux émissions de substances organiques”.

La réglementation particulière pour l'industrie du verre a été publiée en décembre 1993. Une traduction complète de la “Réglementation particulière pour l'industrie du verre” figure dans les Notes néerlandaises sur les MTD, pour les industries du verre et de la laine minérale. Cette réglementation ne s'applique pas au verre plat, au fil de silionne ni à la laine de verre. Toutefois, la réglementation stipule “qu’afin de contrôler les émissions provenant de ces opérations, les technologies mentionnées, dans la présente réglementation s'appliquent en principe, à l'exception de l'oxycombustion, dans la fabrication du verre à vitres”.

Les éléments essentiels de la réglementation particulière, pour l'industrie du verre, s'appuient sur le fait que celle-ci peut prendre deux directions. L'une implique la mise en place d'une technologie oxycombustion, avant 2003 et de moyens de dépoussiérage et d'injection de sorbant avant 2010 ; l'autre la mise en place de moyens de dépoussiérage et d'injection de sorbant, avant 2003, et d'une technique de réduction des NO<sub>x</sub>, avant 2010. Voici un extrait essentiel, de la législation :

**Série de mesures 1. utilisation d'un précipitateur électrostatique \ injection de sorbant en parallèle avec des mesures sur les brûleurs, conformément à la technologie existante, suivie de mesures visant à contrôler les émissions de NO<sub>x</sub>.**

Dès que possible, et en tout état de cause avant l'année 2003 au plus tard, utilisation d'un précipitateur électrostatique, avec injection de sorbant en parallèle, avec une technologie améliorée pour les brûleurs. Au cours de la prochaine remise en état du four, et dans tous les cas avant l'année 2010, mise en place de mesures permettant de limiter les émissions de NO<sub>x</sub>. Le choix des mesures à mettre en œuvre, pour limiter les émissions de NO<sub>x</sub>, dépendra des derniers progrès techniques.

*Indication non normative de la tendance des facteurs d'émission de la série de mesures 1 :*

composant	niveau actuel		jusqu'en 2003	jusqu'en 2010
NO <sub>x</sub> (kg/tonne verre fondu)	5,0	(- 20 %)	4,0	p.m
SO <sub>2</sub> (kg/tonne verre fondu)	2,5	(- 60 %)	1,0	1,0

p.m. : La réduction des émissions qu'il est possible d'obtenir à l'aide des mesures de lutte contre les NO<sub>x</sub>, pendant la période 2003-2010, dépend en grande partie des derniers progrès technologiques et sera précisée plus tard.

## **Série de mesures 2. Utilisation de la technologie oxycombustion, suivie de mesures destinées au SO<sub>2</sub>, aux poussières, au fluor et aux chlorures**

Dès que possible, et en tout état de cause avant l'année 2003 au plus tard, adoption du procédé oxycombustion. Après 2003, ou dès que possible, et en tout état de cause avant l'année 2010, une technologie de pointe, de lutte antipollution, doit être mise en œuvre, par exemple un précipitateur électrostatique avec injection de sorbant, ou une technique équivalente de réduction des émissions.

*Indication non normative de la tendance des facteurs d'émission de la série de mesures 2 :*

composant	niveau actuel	jusqu'en 2003		jusqu'en 2010
NO <sub>x</sub> (kg/tonne verre fondu)	5	1		1
SO <sub>2</sub> (kg/tonne verre fondu)	2,5	2,5	(- 60 %)	1
poussières (kg/tonne verre fondu)	0,4	0,3		0,1

Le fait de commencer par le procédé oxycombustion, comme moyen de réduire les émissions, signifie que la date limite, à laquelle les autres émissions, en particulier, plomb, HF et HCl, doivent être conformes aux normes et conditions générales de la Directive néerlandaise, sur les émissions polluantes, doit correspondre au calendrier de mise en œuvre, des mesures à introduire, dans une seconde phase.

La mise en place des mesures susmentionnées devra – au vu des développements technologiques réalisés – être évaluée par l'autorité compétente de manière de plus en plus détaillée, lorsque le moment sera venu, de remettre les fours en état et/ou de renouveler les autorisations. En outre, dans certains fours de verrerie, la situation peut permettre une mise en œuvre anticipée et/ou combinée de mesures, dans un délai plus court. D'une manière générale, si les résultats de la recherche appliquée montrent que, par exemple, les principaux éléments financiers des technologies étudiées s'écartent des connaissances actuelles, dans un sens positif, une réévaluation de la faisabilité des mesures combinées sera réalisée avant l'année 2003.

Les normes d'émission des NeR n'ont aucun caractère obligatoire et les NeR ne remplacent pas les contrats exécutoires existants. Toutefois, si le service de délivrance des autorisations souhaite déroger aux NeR, les motifs de cette décision doivent être stipulés explicitement, en préambule de l'autorisation d'exploitation.

## **Engagements volontaires**

Les engagements ou conventions, en néerlandais "Convenanten", volontaires sont des déclarations d'intention de mettre en œuvre une politique de protection de l'environnement, pour certains secteurs industriels. Les déclarations d'intention sont des accords entre les autorités et l'industrie. La participation à une convention présente l'intérêt, tant pour les autorités compétentes que pour les entreprises, de renforcer la transparence, la cohérence et la prévisibilité des améliorations et



des investissements en faveur de l'environnement. Les conventions s'appliquent aujourd'hui dans trois domaines :

- Performances générales en matière de lutte contre les polluants “traditionnels”
- Rendement énergétique
- Réduction du CO<sub>2</sub>

*Performances générales en matière de lutte contre les polluants “traditionnels”*

Dans la déclaration d'intention de cet engagement volontaire, les autorités ont établi un Plan d'Action Globale pour l'Environnement, PAGE. Sur la base du Plan National de Politique Environnementale, PNPE, du Protocole sur la Gestion de l'Eau, du Plan d'Action pour la Mer du Nord, du Programme d'Action pour le Rhin, du Protocole sur la Conservation de l'Energie et d'autres programmes officiels en vigueur au moment de la signature.

Le Plan d'Action Globale pour l'Environnement s'intéresse aux rejets dans l'environnement des polluants “traditionnels”, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, métaux lourds, HAP, etc., générés par chacun des secteurs industriels concernés. Le PAGE a été établi pour les années 1994/1995, 2000 et 2010.

Outre la réduction des rejets dans l'air, l'eau et le sol, le PAGE propose également une politique en matière de conservation de l'énergie, de conservation de l'eau, de nettoyage du sol, de gestion des risques, de nuisances dues aux odeurs, de bruit ainsi que des systèmes de gestion interne. Toutefois, notamment pour la conservation de l'énergie et la réduction du CO<sub>2</sub>, deux autres conventions ont été signées.

Pour “l'industrie chimique”, une déclaration d'intention a été signée le 2 avril 1993. Un de ses principaux éléments est la prise en compte du fait que, étant donné l'éventail de sociétés disparates dans l'industrie chimique, la contribution de chacune de ces entreprises à la mise en place du PAGE peut varier. La responsabilité de chaque entreprise dans sa contribution à la mise en place du PAGE pour l'industrie implique que ces sociétés y prennent une part active. La contribution d'une entreprise sera définie par un Plan d'Entreprise pour l'Environnement, “BMP”, qui est établi par chaque société. Ces BMP sont renouvelés tous les quatre ans et doivent être approuvés par les services de délivrance des autorisations.

*Rendement énergétique : Accords à long terme sur le Rendement Energétique*

Aux Pays-Bas, les “Accords à long terme sur le Rendement Energétique”, en néerlandais MJA, ont été conclus entre le ministère des Affaires Economiques et des organisations représentant les nombreux secteurs industriels. L'aspect le plus important des MJA est l'objectif d'amélioration du rendement énergétique, dans le secteur industriel concerné, dans un délai fixé. Pour l'élaboration des MJA, des accords bilatéraux, sont conclus entre chaque société et l'organisme médiateur, l'Agence pour l'Energie et l'Environnement, en néerlandais NOVEM.

Pour la verrerie, un MJA a été signé le 17 juillet 1992 et l'amélioration convenue pour le rendement énergétique était de 20 %, sur la période 1989 - 2000 [78]. L'amélioration du rendement énergétique a été établie, lors du programme technologique, à long terme 1990 – 2010, de l'industrie du verre néerlandaise [7]. Dans ce programme, on a proposé la mise en œuvre des mesures suivantes, d'économie d'énergie, pour la période 1990 – 2000 :

- préchauffage de la composition et du calcin
- augmentation du pourcentage de calcin dans les matières premières
- nouveaux modèles de fours ayant une plus faible consommation d'énergie
- brûleurs avec un meilleur échange de chaleur
- meilleure qualité des produits, moins de perte de production
- produits allégés
- système à oxycombustion

On estime que l'amélioration prévue, de 20 % d'économie d'énergie, devrait entraîner de nouveaux investissements, d'environ 45 millions d'euros<sub>1998</sub> pour la période 1989 - 2000 [7]. Des négociations sont en cours, pour la deuxième génération d'accords à long terme sur le rendement énergétique. Ni leurs objectifs ni leur portée n'ont encore été définis, mais certaines entreprises

de verrerie pourraient adhérer à la “convention d’évaluation comparative” plutôt qu’à l’accord à long terme.

#### *Réduction du CO<sub>2</sub> : Convention d’évaluation comparative*

Dans le cadre des accords de Kyoto, les Pays-Bas doivent réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>. L’amélioration du rendement énergétique est l’une des mesures les plus importantes, pour cet objectif. La convention d’évaluation comparative est un accord entre les autorités néerlandaises et les industries à forte consommation d’énergie. Ces industries ont accepté de figurer parmi les leaders mondiaux, en termes de rendement énergétique, et les autorités s’abstiendront d’imposer des mesures de réduction de CO<sub>2</sub> supplémentaires. La convention est ouverte à toutes les sociétés dont la consommation d’énergie est égale ou supérieure à 0,5 PJ par an.

L’accord de principe a été signé le 6 juillet 1999, entre les organisations industrielles et les pouvoirs publics. Après cette signature, chaque société peut s’engager individuellement dans l’accord en signant la convention.

Pour les sociétés qui ne souhaitent pas y participer, ou dont la consommation d’énergie est inférieure à 0,5 PJ par an, les accords “traditionnels” à long terme, sur l’économie d’énergie, voir ci-dessus, seront poursuivis [43,44].

### 11.3. Législation en vigueur en Autriche

Les **émissions atmosphériques** sont réglementées par une ordonnance, Journal Officiel Fédéral N° 498/1994, dans laquelle figurent les valeurs limites d’émission, pour les différents procédés, combustibles et matériaux. Elle stipule également la périodicité des rapports de surveillance qui doivent être remis aux autorités locales.

Poussières totales : 50 mg/Nm<sup>3</sup>

Substances solides et gazeuses :

Cd : 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>

As : 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>, exception pour le verre au plomb : As 0,5 mg/Nm<sup>3</sup>

Co, Ni, Se : chacun 1,0 mg/Nm<sup>3</sup> mais As, Cd, Co, Ni, Se, au total 1 mg/Nm<sup>3</sup>

Sb, Pb, Cr, Cu, Mn chacun 5,0 mg/Nm<sup>3</sup>, mais métaux totaux : 5 mg/Nm<sup>3</sup>

SO<sub>2</sub> : 500 mg/Nm<sup>3</sup>

HCl : 30 mg/Nm<sup>3</sup>

HF : 5 mg/Nm<sup>3</sup>

NO<sub>x</sub> avec émission massique de 2,5 kg/h ou plus :

1500 mg/Nm<sup>3</sup> pour bassins à boucle ou à brûleurs transversaux avec préchauffage par régénérateur ou récupérateur en céramique

900 mg/Nm<sup>3</sup> pour bassins à brûleurs transversaux avec préchauffage par d’autres récupérateurs

800 mg/Nm<sup>3</sup> pour bassins journaliers et

500 mg/Nm<sup>3</sup> pour d’autres technologies de fusion

- La surveillance des rejets doit être conforme aux Directives VDI
- Le volume de déchets gazeux est limité aux effluents inévitables
- Surveillance de la conformité pour les émissions gazeuses : valeur moyenne de trois demi-heures – l’une mesurée aux conditions de service en se référant au maximum de rejets, toutes mesurées à des conditions de services normales
- Les installations déjà autorisées doivent garantir leur conformité cinq ans après l’annonce de l’entrée en vigueur, de l’ordonnance

**Emissions aqueuses** : les valeurs limites d’émission, ainsi que les méthodes de surveillance, sont fixées par une ordonnance détaillée, Journal Officiel Fédéral N° 888/1995, qui traite des différents types de verres produits et des procédés correspondants.

En général, les circuits d'eau de refroidissement et d'eau de procédé sont séparés. Les systèmes d'eau de refroidissement fonctionnent en circuit fermé et la demande d'appoint est réduite. L'eau de procédé peut être recyclée plusieurs fois et est traitée sur site, séparateur d'huile, sédimentation, avant d'être déversée dans la rivière, eau courante, ou dans une station d'épuration. Différentes limites d'émission existent dans les deux cas.

### Verre perdu (calcin de récupération)

En Autriche, le taux de recyclage du verre perdu est d'environ 77 à 79 %, c'est-à-dire que 200 000 tonnes de verre perdu sont recyclées dans la production de verre d'emballage.

- Le tri du calcin de récupération se fait sur site en Autriche.

#### *Préchauffage du calcin*

Dans les usines autrichiennes, le calcin n'est pas préchauffé.

Mais dans certaines usines en Allemagne et en Suisse, le calcin ou le calcin et la composition, mélange de matières premières, sont préchauffés.

#### *Les déchets contenus dans le calcin de récupération posent-ils des problèmes ?*

- Les déchets organiques dans le calcin entraînent une demande croissante en oxygène, dans l'opération de fusion, et sont à l'origine de rejets de substances organiques dans l'atmosphère.
- La séparation des céramiques et des roches, dans le verre perdu, se fait automatiquement par des méthodes optiques. La quantité de céramiques/roches cassées présentes dans le calcin et introduites dans le fondoir à verre, dépend de l'efficacité de ces dispositifs de vérification optique. On observe une augmentation du nombre d'articles rejetés. La qualité est déterminée par le nombre d'inclusions par tonne de verre.

#### *Les métaux lourds contenus dans le verre perdu posent-ils des problèmes ?*

A part quelques rares exceptions, la limite de 250 ppm de plomb, dans le verre d'emballage, comme le stipule la Directive 94/62/CE, sur les matériaux d'emballage, peut être respectée. La valeur limite d'émission de 100 ppm de plomb dans le verre, qui entrera en vigueur le 30 juin 2001, ne peut pas être garantie avec des taux de recyclage de plus de 50%, comme c'est actuellement le cas en Autriche, dans la production de verre d'emballage.

### Contrôle des Emissions

Les **émissions dans l'air** sont réglementées par une ordonnance, Journal Officiel Fédéral N° 498/1994, dans laquelle figurent les valeurs limites d'émission, pour les différents procédés, combustibles et matériaux. Elle stipule également la périodicité des rapports de surveillance qui doivent être remis aux autorités locales.

Le contrôle continu des émissions dans l'air, à continuation, sont effectués, dans certaines usines de production de verre en Autriche : poussière, NOx, SO<sub>2</sub>

L'oxygène est également contrôlé en continu pour la bonne conduite du procédé.

Par ailleurs, un contrôle discontinu est effectué pour les paramètres suivants :

HCl, HF, métaux lourds

**Emissions aqueuses :** les valeurs limites d'émission ainsi que les méthodes de surveillance sont fixées par une ordonnance détaillée, Journal Officiel Fédéral N° 888/1995, qui traite des différents types de verres produits et des procédés correspondants.

En général, les circuits d'eau de refroidissement et d'eau de procédé sont séparés. Les systèmes d'eau de refroidissement fonctionnent en circuit fermé et la demande d'appoint est réduite. L'eau de procédé peut être recyclée plusieurs fois et est traitée sur site, séparateur d'huile, sédimentation, avant d'être déversée dans une rivière, eau courante, ou dans une station d'épuration. Différentes limites d'émission existent dans les deux cas.

**Déchets :** poussière de filtration et des régénérateurs, déchets des séparateurs d'huile et des réfractaires

### Fours électriques

En Autriche, trois bassins sont actuellement équipés d'un four électrique.

Capacité des bassins : 2 bassins avec environ 20 à 30 tonnes par jour  
1 bassin avec environ 75 tonnes par jour

Produits : verre au plomb, gobeletterie, vaisselle,  
laine de verre  
verres spéciaux pour l'industrie automobile

Fournisseurs de fours électriques pour fondoir à verre de verre, nom des sociétés :  
Sorg, Grob, Horn

Raisons de l'emploi de fours électriques données par les exploitants :

- géométrie du bassin
- enfournement de la charge de verre, voûte froide
- rapport : consommation d'électricité/prix
- consommation d'énergie spécifique
- émissions atmosphériques, rejets de NOx

### Valeurs d'émission des NOx

Valeur limite d'émission en Autriche, pour les bassins à boucle ou à brûleurs transversaux régénératifs ou à récupérateurs en céramique : 1500 mg/Nm<sup>3</sup>, 8% O<sub>2</sub>, comme stipulé dans le Journal Officiel Fédéral N° 498/1994.

Valeur d'émission pour les bassins à boucle régénératifs, appliquant uniquement des mesures de réduction primaires : 900 à 1100 mg/Nm<sup>3</sup> NOx, surveillance discontinue.

Valeur d'émission pour les bassins à boucle régénératifs, appliquant uniquement des mesures de réduction primaires : 1100 à 1300 mg/Nm<sup>3</sup> NOx, surveillance continue.

Un essai pilote, pour une nouvelle réduction des émissions de Nox, en appliquant une "combustion étagée" est prévu par l'exploitant.

Emissions de NOx par les fours électriques : 15 mg/Nm<sup>3</sup> #.

Emissions de NOx par les fours électriques utilisant le nitrate de sodium comme agent d'affinage :

Cristal au plomb : 240 mg/Nm<sup>3</sup> #

# Moyenne de plusieurs, minimum 3, valeurs moyennes demi-horaires, surveillance discontinue.

#### 11.4. Législation et réglementation en Finlande

Il n'existe aucune réglementation particulière en Finlande pour la fabrication du verre.

Les autorisations environnementales sont examinées au cas par cas. Pour déterminer les conditions de délivrance des autorisations, on se base d'abord sur la situation locale, notamment la position géographique et les conditions environnementales locales.

La législation sur la protection de l'environnement est constituée de plusieurs lois distinctes. Une nouvelle Loi de Protection de l'Environnement est en cours de préparation et regroupera les différents textes existants, conformément aux exigences de la Directive du Conseil 96/61/CE de septembre 1996, concernant la Prévention et le Contrôle Intégrés de la Pollution. La nouvelle loi est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> mars 2000.

Actuellement, l'approche intégrée figure dans les deux procédures séparées d'autorisations : la procédure d'autorisation environnementale, en accord avec la Loi sur la Procédure d'Autorisation Environnementale, 735/1991, et son Décret, 772/1992, et la procédure d'autorisation de déversement d'eau, en accord avec la Loi sur la protection de l'eau, 264/1961, et son Décret, 282/1962.

Déjà actuellement, la Loi sur les Procédures d'Autorisation Environnementale regroupe les procédures d'autorisation de la Loi et du Décret sur la Lutte contre le Contrôle de la Pollution de l'Air, la Loi et le Décret sur les Déchets, la Loi et le Décret sur la Protection de la Santé et la Loi sur la Protection du voisinage. Une demande de permis, accompagnée des documents et des valeurs d'émission, est une procédure publique et les personnes et organismes affectés par le projet sont en droit de faire connaître leurs observations.

Pour rédiger les autorisations environnementales, on utilise la Recommandation HELCOM 14/3, 1993, Commission de la Mer Baltique, Convention d'Helsinki. Certaines autorisations environnementales ont été accordées à des fabricants de verre, avant l'application de la Recommandation HELCOM. La plupart des autorisations, accordées à l'industrie du verre, sont assez anciennes et elles seront réexaminées au moment de l'entrée en vigueur de la nouvelle loi de protection de l'environnement. Les valeurs d'émission, prises en compte dans les autorisations, sont les suivantes :

Four de verrerie	
Poussière	50 mg/Nm <sup>3</sup>
NOx	2,5 à 4 kg/tonne

Activités aval pour la laine minérale	
Phénol	0,7 kg/tonne
Formaldéhyde	015 kg/tonne
Ammoniac	1,5 kg/tonne

La surveillance obligatoire figure dans toutes les autorisations environnementales. D'une manière générale, des mesures de toutes les émissions doivent impérativement être réalisées, tous les ans ou tous les trois ans. En outre, les installations sont tenues :

- de minimiser les risques pour la santé et pour l'environnement, causés par des substances toxiques, persistantes et bioaccumulables.
- de remplacer les substances dangereuses dans la mesure du possible
- de minimiser la quantité de déchets et d'en recycler la plus grande quantité possible
- de recirculer l'eau de procédé si possible
- de tenir des registres des émissions et des déchets
- de signaler chaque année les émissions et les déchets aux autorités compétentes

### 11.5. Cadre législatif et réglementaire français

Le cadre législatif français est basé sur la loi du 9 juillet 1976, appelée loi sur les installations autorisées, pour la protection de l'environnement, et ses deux décrets d'application.

Le décret du 21 septembre 1977 définit la procédure à suivre, pour obtenir une autorisation d'exploitation.

Le second décret précise le type d'installations et d'usines, pour lequel un permis est nécessaire.

Cela dépend du secteur et du niveau d'activité.

Ce texte définit également si le permis nécessaire est spécifique au site, procédure d'autorisation d'exploitation, ou général, procédure de déclaration.

Aucune autorisation d'exploitation n'est nécessaire pour certaines activités, en raison de l'impact négligeable pour l'environnement.

Le permis spécifique au site est délivré par les autorités locales, le préfet du département où est implantée l'usine, après une enquête d'utilité publique.

Le permis qui définit les conditions d'exploitation, les valeurs limite d'émission et les obligations de surveillance tient compte :

- des réglementations nationales, publiées pour une activité particulière, ou un groupe de secteurs,
- de l'impact local de l'usine sur l'environnement.

Le permis spécifique au site, élaboré dans le cadre de l'approche intégrée, ne peut être que plus strict que les réglementations nationales.

Pour l'industrie du verre, une réglementation nationale a été publiée en 1993. L'ordonnance du 14 mai 1993 s'applique aux usines dont la capacité de production est supérieure à 5 t/jour pour le verre sodocalcique et à 0,5 t/jour, pour les verres spéciaux. Un permis spécial est également exigé pour ces usines.

L'ordonnance du 14 mai 1993 est jointe en annexe 1 et les principales normes pour la lutte contre la pollution de l'air sont données ci-dessous.

Il est impératif de respecter une des deux valeurs limites d'émission exprimées, soit en concentration, mg/Nm<sup>3</sup> de gaz sec avec une teneur en oxygène de 8 %, soit en masse par tonne de verre produit, kg/t.

#### **Poussière (pour une capacité de production supérieure à 50 tonnes/jour)**

- 0,2 kg/t ou 50 mg/Nm<sup>3</sup>
- 0,35 kg/t ou 50 mg/ Nm<sup>3</sup> pour les verres spéciaux

#### **SO<sub>x</sub> (de formule SO<sub>2</sub>)**

*Verres non oxydés :*

- 1 kg/t ou 500 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au gaz
- 3 kg/t ou 1500 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au combustible liquide

*Verres oxydés :*

- 1,5 kg/t ou 750 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au gaz
- 3,6 kg/t ou 1800 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au combustible liquide
- 0,5 kg/t ou 250 mg/ Nm<sup>3</sup> pour fours électriques

#### **NO<sub>x</sub> (de formule NO<sub>2</sub>):**

- Fours régénératifs :

*Fours à boucle*

3 kg/t ou 1500 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au gaz  
2,6 kg/t ou 1300 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au combustible liquide

*Fours à brûleurs transversaux*

4 kg/t ou 2000 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au gaz  
3 kg/t ou 1500 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au combustible liquide

- Fours à récupération :

2,7 kg/t ou 900 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au gaz  
2,1 kg/t ou 700 mg/ Nm<sup>3</sup> pour chauffage au combustible liquide

- Fours électriques :

1 kg/t ou 500 mg/ Nm<sup>3</sup>

Pour les verres spéciaux et les verres oxydés, par les composés de nitrate, les valeurs limites d'émission de NOx sont doublées.

L'application de ces valeurs limites d'émission est programmée comme indiquée dans le tableau ci-dessous.

Nouvelles installations		Date d'installation
Capacité d'extension supérieure à 25%		Date d'extension
Hausse des émissions de plus de 10%		Date de la hausse des émissions
Anciennes installations	SOx	9 juillet 1998
	NOx	9 juillet 2001
	Poussière	9 juillet 2003

L'ordonnance du 14 mai 1993 définit également les normes concernant les métaux lourds, le HCl, le HF, ainsi que la pollution de l'eau, le bruit, etc.

Ce texte prévoit des mesures intégrées, pour la lutte contre la pollution dans l'industrie du verre. Cette ordonnance a été modifiée en 1996.

Si une installation peut respecter les valeurs limites suivantes d'émission de NOx :

- fours à récupération : 1 kg/t ou 500 mg/Nm<sup>3</sup>
- fours régénératifs :
  - fours à boucle : 1,5 kg/t ou 700 mg/ Nm<sup>3</sup>
  - fours à brûleurs transversaux : 2 kg/t ou 1100 mg/ Nm<sup>3</sup>

les valeurs limites d'émission de poussière autorisées sont de 0,35 kg/t ou 150 mg/ Nm<sup>3</sup> jusqu'en 2004.

Une taxe, sur l'émission atmosphérique, complète ce cadre législatif et réglementaire.

La première taxe pour pollution de l'air a été créée en 1985, pour une période de 5 ans. Elle ne concernait d'abord que les oxydes de soufre. Elle a été renouvelée deux fois, en 1990 puis en 1995.



Seules les installations soumises à une procédure d'autorisation d'exploitation sont concernées par la taxe.

Les sources actuellement taxées sont :

- installations de combustion de plus de 20 MW
- incinérateurs de décharge d'ordures ménagères de plus de 3 t/h
- autres types d'installations autorisées émettant plus de 150 t/an de SO<sub>2</sub>, ou H<sub>2</sub>S exprimé en SO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> compté en équivalent de NO<sub>2</sub>, de HCl ou de COV non méthanoïques.

Le taux d'imposition est actuellement de 180 F/tonne de SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, exprimé en SO<sub>2</sub>, HCl, NO<sub>x</sub>, de formule NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et COV. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1998, les tarifs pour les NO<sub>x</sub> et les COV ont été portés à 250 F/tonne.

La recette fiscale est d'environ 250 MF/an

La taxe sur l'émission atmosphérique est une taxe de redistribution.

Au moins 60% des sommes collectées sont utilisées pour subventionner l'installation d'équipements de prévention ou de traitement.

Seules les industries, répondant aux critères ci-dessus, peuvent prétendre à ces subventions. Elles sont tenues de produire des émissions bien inférieures aux valeurs limites nationales, ou européennes, ou de réaliser d'importantes modifications, avant la date de mise en vigueur des normes nationales ou européennes. Le montant de la subvention dépend de l'efficacité et de l'innovation des techniques.

Le montant des fonds collectés, qui ne sont pas redistribués pour la lutte contre l'émission atmosphérique, au maximum de 40 % des recettes, est utilisé pour :

- aider la recherche appliquée et les initiatives de développement dans le domaine des mesures et des techniques de réduction, prévention ou traitement.
- financer les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, équipement et coûts d'exploitation.
- réaliser des études techniques ou économiques sur les émissions, les stocks, les stratégies de développement, etc.

Le taux d'imposition n'est pas assez élevé pour être incitatif. Il est généralement moins coûteux de payer la taxe que de mettre en œuvre une technique de réduction des polluants efficace. Toutefois, en raison du montant assez élevé des subventions accordées, en particulier dans le passé, ce système fiscal de redistribution s'est avéré être un outil efficace et souple, qui accompagne les réglementations, en encourageant l'installation des meilleures technologies disponibles.

## 11.6. Législation italienne

La législation en vigueur repose sur le Décret du ministère de l'Environnement du 12 juillet 1990 et s'applique aux installations existantes.

### **Valeurs limites générales d'émission appliquées à la plupart des secteurs industriels :**

*Pour les substances carcinogènes :*

Substances de Classe 1 : Il n'y en a pas normalement dans l'industrie du verre.  
Si le débit massique est  $\geq 0,5$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $0,1 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 2 : Arsenic, chrome ,VI, cobalt, nickel, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 5$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 3 : Il n'y en a pas normalement dans l'industrie du verre.  
Si le débit massique est  $\geq 25$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $5 \text{ mg/m}^3$ ,

*Pour les substances inorganiques sous forme particulière :*

Substances de Classe 1 : cadmium, mercure, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 1$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $0,2 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 2 : sélénium, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 5$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 3 : antimoine, chrome ,III, quartz de plomb, cuivre, étain, vanadium.  
Si le débit massique est  $\geq 25$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $5 \text{ mg/m}^3$ .

*Pour les substances inorganiques sous forme gazeuse :*

Substances de Classe 1 : il n'y en a pas normalement dans l'industrie du verre.  
Si le débit massique est  $\geq 10$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 2 : fluorures de type HF, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 50$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $5 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 3 : chlorures de type HCl, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 0,3$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $30 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 4 : ammoniac  
Si le débit massique est  $\geq 2$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $250 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 5 : oxydes d'azote de formule  $\text{NO}_2$ , oxydes de soufre de formule  $\text{SO}_2$   
Si le débit massique est  $\geq 5$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $500 \text{ mg/m}^3$ .

*Pour les substances organiques sous forme gazeuse et particulière :*

Substances de Classe 1 : acrilate de méthyle, isocyanate, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 25$  g/h, la valeur limite d'émission est de  $5 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 2 : phénols, formaldéhyde, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 0,1$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $20 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 3 : alcool isobutylique, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 2$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $150 \text{ mg/m}^3$ .

Substances  $\geq 3$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $300 \text{ mg/m}^3$ .

Substances de Classe 5 : acétone, etc.  
Si le débit massique est  $\geq 4$  kg/h, la valeur limite d'émission est de  $600 \text{ mg/m}^3$ .

*Poussières*

Si le débit massique est  $\geq 0,5$  kg/h, la valeur limite d'émission est de 50 mg/m<sup>3</sup>.

Si le débit massique est  $\geq 0,1$  kg/h et  $< 0,5$  kg/h, la valeur limite d'émission est de 150 mg/m<sup>3</sup>.

### **Valeurs limites spéciales d'émission appliquées aux fours pour la fabrication du verre**

*Oxydes d'azote de formule NO<sub>2</sub>*

	Fioul	Gaz naturel
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Fours à pots	1200	1200
Bassins continus avec récupération de chaleur	1200	1400
Bassins journaliers	1600	1600
Fours régénératifs, à boucle, flamme en fer à cheval	1800	2200
Fours régénératifs, à brûleurs transversaux	3000	3500

Pour des raisons de qualité, l'utilisation de nitrates dans la composition permet de doubler la valeur limite.

*Oxydes de soufre de formule SO<sub>2</sub>*

Bassins journaliers et fours à pots      1100    mg/m<sup>3</sup>

Bassins de verrerie continus      1800    mg/m<sup>3</sup>

*Poussières totales*

Si la production est  $\geq 250$  t/jour, la valeur limite d'émission est de 80 à 100 mg/m<sup>3</sup>

Si la production est  $< 250$  t/jour et le débit massique est  $\geq 0,1$  kg/h, la valeur limite d'émission d'émission est de 150 mg/m<sup>3</sup>

Pour la fibre de verre, le fil de silionne, les tubes borosilicatés, la valeur limite d'émission est de 350 mg/m<sup>3</sup>.

Les valeurs concernent les volumes de gaz sec, à 8 % d'oxygène pour les bassins continus et à 13 % d'oxygène pour les fours discontinus.

Note : Les valeurs limites d'émission s'appliquent aux installations existantes.

Normalement, un four fonctionnant à des niveaux d'émission inférieurs aux valeurs limite d'émission officielles est tenu de conserver ces valeurs. Pour des domaines et/ou des raisons spécifiques, les valeurs les plus basses peuvent s'appliquer.

Pour les nouvelles installations, les autorités régionales peuvent décider d'utiliser les mêmes valeurs limite d'émission, assez rare, ou normalement, des valeurs limite d'émission plus strictes, sur la base des "meilleures techniques disponibles".

## 11.7. VALEURS STANDARD D'EMISSION POUR L'INDUSTRIE DU VERRE EN REGION WALLONNE

POUSSIERES		5 ≤ --- ≤ 50 t/jour		> 50 t/jour		50		5 < --- < 10 t/jour < --- < 50			
	mg/Nm <sup>3</sup>			50		50					
	kg/t fonte	1,2 < ---- < 0,2		0,2		0,35		14 < --- > 1,1 < --- > 0,35			
SOx											
Sulfates = 0		Fioul	Gaz			Fioul	Gaz		Fioul	Gaz	
	g/Nm <sup>3</sup>	1,5	0,5			1,5	0,5		1,5	0,5	
	kg/t fonte	3	1			3	1		3	1	
Sulfates > 0		Fioul	Gaz		Elect	Fioul	Gaz	Elect	Fioul	Gaz	Elect
	g/Nm <sup>3</sup>	1,8	0,75		0,25	1,8	0,75	0,25	1,8	0,75	0,25
	kg/t fonte	3,6	1,5		0,5	3,6	1,5	0,5	3,6	1,5	0,5
NOx		BL	BC	R	E			R			R
Nitrates = 0		Fioul/Gaz	Fioul/Gaz	Fioul/Gaz				Fioul/Gaz			Fioul/Gaz
(*)	g/Nm <sup>3</sup>	1,5/2,0	1,3/1,5	0,7/0,9	0,5			0,7/0,9			0,7/0,9
(*)	kg/t fonte	3,0/4,0	2,6/3,0	2,1/2,7	1			2,1/2,7			2,1/2,7
Nitrates > 0		Fioul/Gaz	Fioul/Gaz	Fioul/Gaz				Fioul/Gaz			Fioul/Gaz
(**)	g/Nm <sup>3</sup>	3,0/4,0	2,6/3,0	1,4/1,8	1,0			1,4/1,8			1,4/1,8
(**)	kg/t fonte	6,0/8,0	5,2/6,0	4,2/5,4	2			4,2/5,4			4,2/5,4
HCl (***)	mg/Nm <sup>3</sup>	50 / 100		50 / 100		50 / 100		50 / 100			
	kg/t fonte	0,175/0,350		0,175/0,350		0,175/0,350		0,175/0,350			
HF (***)	mg/Nm <sup>3</sup>	5,0/2,0		5,0/20		5,0/20		5,0/20			
	kg/t fonte	0,035/0,14		0,035/0,14		0,035/0,14		0,035/0,14			
	mg/Nm <sup>3</sup>	50		50		50		50			
NH <sub>3</sub> (****)		mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t fonte	mg/Nm <sup>3</sup>		kg/t fonte	mg/Nm <sup>3</sup>		kg/t fonte	mg/Nm <sup>3</sup>	kg/t fonte
METALLS LOURDS (*****)											
Cd						0,2		0,0014	0,2		0,0014
As <sub>terre</sub> , Co, Ni, Se, Cr <sup>6+</sup>						1		0,007	1		0,007
Sb						3		0,021	3	3	0,021
As <sub>gaz</sub> , Cr <sub>tot</sub> , Pb, V						5		0,035	5		0,035
(Cr <sup>6+</sup> +Pb+Cd+Sb+Ni+Co+Se+V)		≤ 5		≤ 0,035		≤ 5		≤ 0,035		≤ 5	
(Cr <sub>tot</sub> +Pb+Cd+Sb+Ni+Co+Se+V)											

< --- > : Interpolation linéaire, BL=Fours à brûleurs transversaux, BC=Fours à boucle, régénératifs, R=Fours à unités, fours à pots, récupération, E=Fours électriques.

Valeurs limites d'émission : à 20,8 % O<sub>2</sub>, fours électriques, 13 % O<sub>2</sub>, fours à pots, ou 8 % O<sub>2</sub>, autres, à respecter en mg ou g/Nm<sup>3</sup> ou en kg/t fonte.

(\*) Pas pour la fibre de verre

- (\*\*) Pour la fibre de verre uniquement, utiliser yyy dans xxx/yyy
- (\*\*\*) Matières premières sans Cl ni F / avec Cl ou F
- (\*\*\*\*) Pour dénitrification
- (\*\*\*\*\*) Verre plat et d'emballage > 50 t/jour avec fioul, en recyclant > 80% en poids de matières premières, somme des éléments,  $\leq 10 \text{ mg/Nm}^3$  ou 0,07 kg/t fonte.



## LEXIQUE

Abréviations			
ac, pol,	acid polishing/polished (polissage à l'acide)	NL	Pays Bas
CE	Commission Européenne	PCIP	Prévention et Contrôle Intégrés des Pollutions
COV	Composés, Organiques, Volatiles,	PE	Précipitateur Electrostatique
CPIV	Comité Permanent des Industries du Verre	PEH	Précipitateur Electrostatique Humide
CRF	Chemical Reduction by Fuel, Réduction chimique au Fuel	RCF	Refractory Ceramic Fibre
CRT	(Cathode Ray Tube), Tube cathodique	SCR	Réduction Catalytique Sélective
CVD	Dépôt de Vapeur par voie chimique	SNCR	Réduction Catalytique Non Sélective
DBO	Demande Biologique en Oxygène	tpj	tonnes par jour
DCO	Demande Chimique en Oxygène	TV	Télévision
EURIMA	European Insulation Manufacturers Association	RU	Royaume Uni
IS /SI	Individual Section, Section Individuelle	UE	Union Européenne
MTD	Meilleure Technique Disponible	USA	Etats Unis

Eléments			
Ag	Argent	Li	Lithium
Al	Aluminium	Mg	Magnésium
Ar	Argon	Mn	Manganèse
As	Arsenic	Mo	Molybdène
B	Bore	N	Azote
Ba	Baryum	Na	Sodium
Be	Béryllium	Ni	Nickel
Bi	Bismuth	O	Oxygène
C	Carbone	P	Phosphore
Ca	Calcium	Pb	Plomb
Cd	Cadmium	Pd	Palladium
Ce	Cérium	Pt	Platine
Cl	Chlore	S	Soufre
Co	Cobalt	Sb	Antimoine
Cr	Chrome	Se	Sélénium
Cs	Césium	Si	Silicium
Cu	Cuivre	Sn	Etain
F	Fluor	Sr	Strontium
Fe	Fer	Ti	Titane
H	Hydrogène	V	Vanadium
Hg	Mercure	W	Tungstène ,Wolfram,
K	Potassium	Zn	Zinc
		Zr	Zirconium



Formules chimiques couramment utilisées dans ce document			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde d'aluminium, alumine	MgCO <sub>3</sub>	Carbonate de magnésium
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trioxyde de bore	MgO	Oxyde de magnésium, magnésie
CaCO <sub>3</sub>	Carbonate de calcium, calcaire	N <sub>2</sub>	Azote moléculaire
CaF <sub>2</sub>	Fluorure de calcium, spath fluor	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonate disodique, soude
CaO	Oxyde de calcium, chaux	Na <sub>2</sub> O	Monoxyde de sodium
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hydroxyde de calcium, chaux	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfate de sodium
CaSO <sub>4</sub>	éteinte	N <sub>2</sub> O	Oxyde nitreux
CO	Sulfate de calcium	NO	Oxyde nitrique
CO <sub>2</sub>	Monoxyde de carbone	NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dioxyde de carbone	NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote, NO et NO <sub>2</sub> seuls,
HCl	Oxyde de fer, oxyde ferrique	PbO	Oxyde de plomb, massicot, litharge
HF	Acide chlorhydrique	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Oxyde de plomb, minium, tétraoxyde de plomb
H <sub>2</sub> S	Fluorure d'hydrogène	SiO <sub>2</sub>	Oxyde de silicium
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Sulfure d'hydrogène	SO <sub>2</sub>	Anhydride sulfureux
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acide hexafluorosilicique	SO <sub>3</sub>	Trioxyde de soufre
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Acide sulfurique	SO <sub>x</sub>	Oxydes de soufre, SO <sub>2</sub> et SO <sub>3</sub> ,
K <sub>2</sub> O	Carbonate de potassium, potasse		
	Oxyde de potassium		

Unités			
euro	Unité monétaire de l'Union européenne, Etats membres	kWh	kilowatt par heure
		J	Joule
		GJ	Gigajoule
kPa	kilo pascal	s	seconde
°C	Degré centigrade/Celsius	h	heure
g	gramme	j	jour
kg	kilogramme	a	année
t	Tonne, 1000 kg	t/j	tonnes par jour
mm	millimètre	t/a	tonnes par an
cm	centimètre		
m	mètre		
m <sup>2</sup>	mètre carré		
m <sup>3</sup>	mètre cube		
Nm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> à 273 K, 101,3 kPa, sec		

Préfixes			
η	nano 10 <sup>-9</sup>	M	mega 10 <sup>6</sup>
μ	micro 10 <sup>-6</sup>	G	giga 10 <sup>9</sup>
m	milli 10 <sup>-3</sup>	T	tera 10 <sup>12</sup>
c	centi 10 <sup>-2</sup>	P	peta 10 <sup>15</sup>

k	kilo 10 <sup>3</sup>		
---	----------------------	--	--

**BIBLIOGRAPHIE**

[96/61/EC]

Directive 96/61/CE concernant la Prévention et le Contrôle Intégrés de la Pollution, 10/10/96.

[tm1, RUDoE]

Pollution Control at Large Glass Works, RU Service de l'Environnement, Environmental Resources Limited, mars 1991, gls/tm/1.

[tm2 3R]

3R Process, NOx Control Technology from Pilkington, Pilkington company publication, septembre 1994, gls/tm/2.

[tm3 NOxEPA]

Alternative Control Techniques Document – NOx Emissions from Glass Manufacturing, United States Environmental Protection Agency, juin 1994, gls/tm/3.

[tm4 VDI88]

Verein Deutscher Ingenieure Guidelines, VDI 2578, Emission Control Glassworks, 1988,

[tm5 EEO]

Energy Efficient Environmental Control in the Glass Industry, Good Practice Guide 127, RU Energy Efficiency Office, 1995, gls/tm/5.

[tm6 NOx Ind,duVerre]

Reduction des Emissions d'Oxydes d'Azote dans L'Industrie du Verre, Comité de Suivi du Verre, Arrêté du 14 mai 1993, juillet 1996, gls/tm/6.

[tm7 HMIP]

Technical and Economic Review of Technique to Control Emissions from Non-asbestos mineral fibres and Frit Manufacturing Processes, Environment Agency, Angleterre et Pays de Galles, août 1996, gls/tm/7.

[tm8, S2 3,03]

IPC Guidance Note S2 3,03, Manufacture of glass fibres, other non-asbestos mineral fibres, glass frit, enamel frit and associated processes, Environment Agency, HMSO, septembre 1996, ISBN 0-11-310121-X, gls/tm/8.

[tm9 BATNEEC4,3]

BATNEEC Guidance Note – Glass Production , Draft, Irish Environmental Protection Agency, 1996, gls/tm/9.

[tm10 BATNEEC4,2]

BATNEEC Guidance Note – Manufacture of Glass Fibre or Mineral Fibre, Draft, Irish Environmental Protection Agency, 1996, gls/tm/10.

[tm11 SOx]

Prévention et traitement des émissions d'oxydes de soufre, Actes du Colloque, Colloque National, 4 et 5 décembre 1997, Le Havre, gls/tm/11.

[tm12 desulf]

Les techniques de désulfuration des procédés industriels, Version préliminaire, 1998, gls/tm/12.

[tm13 Ademe NOx]

Comment réduire les émissions d'oxydes d'azote d'origine industrielle ? Recueil des conférences des journées techniques organisées à Angers, les 25 et 26 septembre 1996, Ademe, gls/tm/13.

[tm14 ETSU]

Energy Technology in the Glass Industry Sector, Thermie, ETSU, AEA Environment and Energy, mars 1992.

[tm15 Italy]

Reference Document for the Application of IPPC 96/61/EC to the Italian Glass Industry, Edited B Scalet, Stazione Sperimentale del Vetro, janvier 1998.

[tm16 USEPA]

EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, Profile of the Stone, Clay, Glass, and Concrete Products Industry, US Environmental Protection Agency, septembre 1995, gls/tm/16.

[tm17 Ercole]

Oxycombustion: The Problems and Perspectives for Development of its Use in Glass Containers Production, P Ercole, Paper presented at US Ceramic Society congress on glass, San Francisco, juillet 1998, gls/tm17.

[tm18 CPIV]

COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE BAT Reference Document for the European Glass Industry, janvier 1998.

Comité Permanent des Industries du Verre, gls/tm/18, avec les suppléments

[tm19 5yrsLoNOx]

Five years of operational experience with the SORG LoNOx Melter, Ehrig, Wiegand and Neubauer, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 68 ,1995, No2, gls/tm/19,

[tm20 SORG]

Optimierung einer großen Glasschmelzwanne durch Primärmaßnahmen, um eine emissionsarme und energiesparende Betriebsweise zu ermöglichen, Niklaus Sorg GmbH & Co, 1997, gls/tm/20.

[tm21, Schott]

Schott Guide to Glass second Edition, Ed HG Pfaender, Chapman & Hall, 1996  
ISBN 0-412-71960-6, gls/tm21.

[tm22 BOC]

Environmental Technologies for Glass, A Guide to Green Glass Manufacturing, Lehman and Umeza, BOC Gases, 1996, gls/tm/22.

[tm23 SCRPLM]

First practical experiences with an SCR deNOx facility in a container glassworks, Schmalhorst and Ernas, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 68 ,1995, No5, gls/tm/23.

[tm24 FENIX]

Saint-Gobain Vitrage Réduit les Rejets de NOx du Float d'Aniche à près de 500 mg/Nm<sup>3</sup> par des Mesures Primaires, Brulin, Delacroix, Laffont et Tackels, L'Industrie Céramic & Verrière-No938-6-7/98, 1998, gls/tm/24.

[tm25 Special]

Document de Référence de l'Industrie Européenne du Verre pour la mise en oeuvre de la Directive 96/61/EC, Comité Permanent des Industries du Verre, Mai 98, gls/tm/25, avec les suppléments.

[tm26, EURIMA]

EURIMA BAT Reference note on insulation wool production, octobre 1998.

European Insulation Manufacturers Association, gls/tm/26, avec suppléments

[tm27, Domestic]

Document de Référence de l'Industrie de Vaisselle et de Gobeletterie pour la mise en œuvre de la Directive 96/61/CE, Comité Permanent des Industries du Verre, Secteur Européen de la Gobeletterie, avril 98, gls/tm/27, avec les suppléments.

[tm28, EMPA]

Life Cycle Inventories for the Production of Sodium Silicates, EMPA, Bericht Nr, 241, M Fowler, 1997.

[tm29, Infomil]

Dutch Notes on BAT for the Glass and Mineral Wool Industry, Infomil for Dutch Ministry of Environment, Directorate for Air and Energy, décembre 1998.

[tm30 Dust]

An examination of the low environmental impact of dust emitted by soda-lime glass furnaces, COMATE PERMANENT DES INDUSTRIES DUE VERGE, 1998, gls/tm/30.

[tm31 69/493/EEC]

Directive du Conseil 69/493/EEC sur l'approximation de la législation des Etats membres sur le cristal, 1969, Journal Officiel des Communautés Européennes, gls/tm/31.

[tm32 Beerkens]

Abatement of glass furet remissions techniques, performance, cosys an possible combinassions of abatement techniques, RC Beerkens, février 1999, gls/tm/32.

[tm33 1<sup>0</sup>NO<sub>x</sub>]

Primary measures for the NO<sub>x</sub> reduction on glass melting furnaces, Sieger, Glastech, Ber, 62, 1989, Nr,5, gls/tm/33.

[tm34 SCRCG]

Experience with an SCR DeNO<sub>x</sub> plant for container glass furnaces, Schmalhorst, Ernas and Jeschke, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 70, 1997, No11, gls/tm/34.

[tm35 SNCR]

Noncatalytic removal of nitrogen in a recuperative container glass furnace, Pabst, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 67 ,1994, No,3, gls/tm/35.

[tm36 FENIXpat,]

Numéro de Publication du Brevet WO 98/02386, Méthodes y dispositifs pour la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> dans un four à verre, Saint-Gobain Vitrage, 1998, gls/tm/36.

[tm37 3Rpat,]

Patent publication number 0 599 548 A1, Pilkington Glass Limited, gls/tm/37.

[tm38 3Rpat,b]

Patent publication number 0 599 547 A1, Pilkington Glass Limited, gls/tm/38.

[tm39 3Rupdate]

Pilkington 3R Technology: An Update, Shulver and Quirk, Ceram, Eng, Sci, Proc, 18 [1], 1997, gls/tm/39.

[tm40 ECFIA]

- ECFIA Information Report on Environmental Performances of RCF Manufacturing Plants in Europe, ECFIA, décembre 1998, gls/tm/40.
- [tm41 VDI 2578]  
Verein Deutscher Ingenieure Guidelines ,VDI 2578, Emission Control Glassworks, DRAFT, Novembre 1997.
- [tm42 filterdust]  
Recycling of cullet and filter dust in the German glass industry, Schaeffer, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 69 ,1996, No, 4, gls/tm/42.
- [tm43 SORGecon]  
Comparison of ecological and economic aspects of a modern regenerative end-fired furnace and the second generation Sorg LoNOx Melter, Pieper, Platzer and Becher, Glastech, Ber, Glass Sci, Technol, 68 , 1995, No, 7, gls/tm/43.
- [tm44 Frits]  
Ceramic Decorating Materials-Aspects of Product Stewardship, ANFFECC / CERAMICOLOR / EPSOM / VdMi, 1998, gls/tm/44.
- [tm45 Illy]  
Processes for heat recovery and energy savings in oxy-fired glass furnaces: a technology survey, Illy, Borders, Joshi, Zucchelli, Jurcik, International Glass Journal ,1998, – No 96, gls/tm/45.
- [tm46 ANFFECC]  
Reference Document of the Spanish Frits Industry for the Implementation of the Directiva IPPC 96/61/EC, février 1999, gls/tm/46.
- [tm47 BAT France]  
Document de référence sur les MTD, soumis au Bureau EI PPC, Ministère français de l'Environnement, février 1998, gls/tm/47.
- [tm48 ADEME SOx]  
Les techniques de désulfuration des procédés industriels, ADEME, 1999, gls/tm/48.
- [tm50 HMIP Frit]  
Pollution Control at Glass and Enamel Frit Plants, HMIP, Septembre 1991, gls/tm/50.
- [tm51 UBA]  
Stand der Technik bei der glasherstellung, Umweltbundesamt - Autriche, 1999, gls/tm/51,
- [tm52 Karlsruhe]  
Emission Control at stationary Sources in the Federal Republic of Germany Vol I +II – NOx, SOx and heavy metals, FGI ER University of Karlsruhe ,TH, Août 1996, gls/tm/52,
- [tm53 Gas Reburning]  
Application of Gas Reburning Technology to Glass Furnaces for NOx Emissions Control, Moyeda Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/53.
- [tm54 Gas Reburning2]  
Glass Furnace NOx Control with Gas Reburn, Koppang and Moyeda, Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/54.
- [tm55 Field Test]  
Glass Furnace NOx Control with Gas Reburn The Field Test ,draft article, Koppang, Marquez and Moyeda, Energy and Environmental Research Corporation, Irvine California, gls/tm/55.

## Bibliographie

---

[tm56 GazdeFrance]

Le Reburning: un bon moyen de réduction des émissions d'oxydes d'azote dans les fondoirs à verre, Projet Reburning Gaz, Gaz de France, décembre 1996, gls/tm/56.

[statistiques COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE]

COMITÉ PERMANENT DES INDUSTRIES DU VERRE statistics presented to European Commission Joint Meeting Mai 1998, Comité Permanent des Industries du Verre.

[statistiques EURIMA]

EURIMA Statistics report provided to European IPPC Bureau Mai 1998

European Insulation Manufacturers Association

[SORG Flex]

SORG Brochure on Flex Melter – “Discontinuous Production Constant Quality”, Nikolaus SORG GmbH & Co KG.

[SORG LoNOx]

SORG Brochure on LoNOx Melter, Nikolaus SORG GmbH & Co KG.

[ANFFECC]

BREF Support Document for the Spanish Frits Industry, Draft1, ANFFECC, octobre 1998.