

Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour la fabrication du verre

Introduction

Les Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (Directives EHS) sont des documents de références techniques qui présentent des exemples de bonnes pratiques internationales¹, de portée générale ou concernant une branche d'activité particulière. Lorsqu'un ou plusieurs États membres participent à un projet du Groupe de la Banque mondiale, les Directives EHS doivent être suivies conformément aux politiques et normes de ces pays. Les directives EHS établies pour les différentes branches d'activité sont conçues pour être utilisées conjointement avec les Directives EHS générales, qui présentent des principes directeurs environnementaux, sanitaires et sécuritaires applicables dans tous les domaines. Les projets complexes peuvent exiger l'application de plusieurs directives couvrant des branches d'activité différentes. La liste complète de ces directives figure à l'adresse suivante :

<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Les Directives EHS indiquent les mesures et les niveaux de performance qui sont généralement considérés réalisables dans de nouvelles installations avec les technologies existantes à un coût raisonnable. L'application des Directives EHS dans des

¹ C'est-à-dire les pratiques que l'on peut raisonnablement attendre de professionnels qualifiés et chevronnés faisant preuve de compétence professionnelle, de diligence, de prudence et de prévoyance dans le cadre de la poursuite d'activités du même type dans des circonstances identiques ou similaires partout dans le monde. Les circonstances que des professionnels qualifiés et chevronnés peuvent rencontrer lorsqu'ils évaluent toute la gamme des techniques de prévention de la pollution et de dépollution applicables dans le cadre d'un projet peuvent inclure, sans toutefois s'y limiter, divers degrés de dégradation environnementale et de capacité d'assimilation de l'environnement ainsi que différents niveaux de faisabilité financière et technique.

installations existantes peut nécessiter la définition d'objectifs spécifiques à chaque site et l'établissement d'un calendrier adapté pour atteindre ces objectifs.

Le champ d'application des Directives EHS doit être fonction des aléas et des risques identifiés pour chaque projet sur la base des résultats d'une évaluation environnementale qui prend en compte des éléments spécifiques au projet, comme les conditions en vigueur dans le pays dans lequel le projet est réalisé, la capacité d'assimilation de l'environnement, et d'autres facteurs propres au projet. La mise en oeuvre de recommandations techniques particulières doit être établie sur la base de l'opinion professionnelle des personnes ayant les qualifications et l'expérience nécessaires.

Si les seuils et normes stipulés dans les réglementations du pays d'accueil diffèrent de ceux indiqués dans les Directives EHS, les normes les plus rigoureuses seront retenues pour les projets menés dans ce pays. Si des niveaux moins contraignants que ceux des Directives EHS peuvent être retenus pour des raisons particulières dans le contexte du projet, une justification détaillée pour chacune de ces alternatives doit être présentée dans le cadre de l'évaluation environnementale du site considéré. Cette justification devra montrer que les niveaux de performance proposés permettent de protéger la santé de la population humaine et l'environnement.

Champ d'application

Les Directives EHS pour la fabrication du verre présentent des informations pertinentes concernant les installations de fabrication du verre. Elles ne couvrent pas l'extraction des matières premières qui est traitée dans les Directives EHS pour l'extraction des matériaux de construction. L'annexe A présente une description complète de la branche d'activités concernée.

Ce document se compose des sections ci-après :

- Section 1.0 — Description et gestion des impacts propres aux activités considérées
- Section 2.0 — Indicateurs de performance et suivi des résultats
- Section 3.0 — Bibliographie
- Annexe A — Description générale des activités

1.0 Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

Cette section résume les questions d'ordre environnemental, sanitaire et sécuritaire liées à la fabrication du verre qui peuvent se poser au cours de la phase d'exploitation, et elle présente des recommandations quant à leur gestion. Les recommandations relatives à la gestion des questions communes à la plupart des projets de grande envergure au cours de leurs phases de construction et de démantèlement figurent dans les Directives EHS générales.

1.1 Environnement

Les questions environnementales liées à la fabrication du verre portent principalement sur les aspects suivants :

- Les émissions atmosphériques
- Les eaux usées
- Les déchets solides

Émissions atmosphériques

La fabrication du verre est une activité qui s'effectue à haute température et qui consomme de grandes quantités d'énergie, ce qui se traduit par l'émission de sous-produits de combustion (dioxyde de soufre, bioxyde de carbone et oxydes d'azote) et par l'oxydation à haute température de l'azote atmosphérique. Les émissions des fours contiennent également des matières particulaires (MP) et peuvent contenir de faibles quantités de métaux. Entre 80 et 90 % du total des émissions atmosphériques de polluants d'une fabrique de verre proviennent des fours de fusion. Les émissions des phases de formage et de finition dépendent des processus particuliers utilisés pour produire des verres. Les presses destinées à la fabrication des verres creux et les machines à souffler sont celles qui ont les émissions les plus importantes parce que les parois entrent en contact avec les lubrifiants des matériels utilisés. La fabrication de verre plat, de verre creux et de vaisselle ainsi que la production du verre artistique génèrent également des émissions liées à la combustion lors du processus de cuisson au cours duquel le produit en verre est maintenu à une température de 500–550°C par un processus de refroidissement contrôlé dans l'arche de cuisson.

Il est recommandé aux fabricants d'alléger les récipients et la vaisselle en verre car cela est un moyen efficace de réduire les impacts environnementaux en augmentant le nombre d'articles qui peuvent être fabriqués à partir d'un poids de verre en fusion donné.

Matières particulaires

Les matières particulaires sont des polluants générés en quantités importantes par les fabriques de verre. Tous les sous-secteurs de cette branche d'activité utilisent des matières premières pulvérulentes, granuleuses ou poussiéreuses. Ils procèdent tous aussi au stockage et au mélange des matières premières. Le transport, la manutention, le stockage et le

mélange des matières premières sont des sources typiques d'émissions de poussières. Ces dernières sont généralement plus grosses que les particules émises par les procédés chauds dont la taille est inférieure à $1\mu\text{m}$, bien que les petites particules s'agglomèrent facilement pour former de plus grosses particules. Alors que la poussière émise par les processus de manutention pose un problème qui relève principalement de l'hygiène et de la sécurité au travail, les MP générées par les processus chauds dans l'atelier de mélange posent un risque environnemental.

Les principales techniques recommandées pour prévenir et maîtriser les émissions de poussière et minimiser les impacts que peuvent causer le transport, la manutention, le stockage et le mélange des matières premières consistent, notamment, à :

- isoler les aires de stockage et l'atelier de composition des autres zones d'opérations ;
- utiliser des silos fermés pour stocker les matières destinées à la préparation de la composition ;
- réduire la quantité de particules fines dans la composition en l'humidifiant au moyen d'eau ou de solutions alcalines (par exemple, hydroxyde de sodium, $[\text{NaOH}]$, carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$) ou en employant des techniques de préfrittage, de briquetage ou de palletisation.
- adopter de bonnes pratiques de chargement et de déchargement ;
- transporter jusqu'aux fours, dans des convoyeurs fermés, les matières premières utilisées pour la composition ;
- procéder à des contrôles dans la zone d'alimentation du four (p. ex., humidification de la composition ; exploitation équilibrée du four pour maintenir une pression légèrement positive ($<10\text{ Pa}$) pour améliorer l'efficacité de la combustion tout en limitant le risque d'émission de poussières ; extraction de la poussière au moyen de

filtres ; distributeurs à vis clos ; et poches pour goulettes d'alimentation).

Les principales sources d'émissions atmosphériques de matières particulaires fines dans le cadre du processus de fusion sont la combinaison des composantes volatiles de la composition et de la fusion avec des oxydes de soufre pour produire des composés qui se condensent dans les gaz résiduaux des fours, l'apport de matériaux fins dans la composition et la combustion de certains combustibles fossiles.

Les mesures de prévention et de dépollution destinées à réduire les émissions de particules consistent, notamment, à :

- accroître la quantité de calcaire utilisée ;
- optimiser la conception et la géométrie du four pour pouvoir réduire la température du four ;
- utiliser des combustibles à faible teneur en soufre ;
- examiner les possibilités d'optimiser les modes de chargement, la grosseur des grains et l'humidité des matières utilisées.

Lorsque les principales mesures de contrôle des particules qui sont énoncées ci-dessus sont dûment appliquées, les concentrations d'émissions de particules de gaz d'évacuation des fours peuvent être inférieures à 100 mg/Nm^3 . Les émissions de particules qui persistent augmentent avec la vétusté du four parce que la détérioration du réfractaire entraîne un accroissement de la consommation d'énergie et, partant, de la vitesse des produits de combustion dans les fours.

Parmi les techniques de prévention et de dépollution qui peuvent être employées pour réduire les émissions de poussière au point de sortie figurent l'installation de

précipitateurs électrostatiques ou de filtres à sac². Les précipitateurs électrostatiques peuvent collecter entre 95 et 99 % de la poussière et atteindre des concentrations d'émissions de 20 mg/m³. Cependant, en raison de leur coût³ élevé, ils ne sont généralement utilisés que par les grandes fabriques de verre qui possèdent au moins deux unités de fusion, ce qui leur permet de réaliser des économies d'échelle. Le coût des précipitateurs électrostatiques et des filtres à sac est extrêmement variables et dépend, dans une large mesure, de la performance requise et du volume de gaz résiduaire. Les filtres à sac sont utilisés lorsque les volumes de gaz de combustion sont relativement faibles, généralement de l'ordre de 20 000 à 30 000 Nm³/h, tandis qu'il est préférable d'utiliser des précipitateurs électrostatiques lorsque le débit des gaz résiduaire est plus élevé. Les systèmes de filtres à sac (également appelés « filtres en tissu »)⁴ sont également très efficaces et atteignent un rendement de collecte de 95 à 99 %.

Oxydes d'azote

Les principales sources d'émission d'oxydes d'azote (NO_x) sont la génération de NO_x thermique causée par les températures élevées dans les fours, la décomposition des composés d'azote

² Telle que définie par la législation de l'Union européenne, l'installation de ces types de dépollueurs est considérée comme la meilleure technique disponible actuellement.

³ Les coûts d'équipement (y compris l'épuration des gaz acides) sont en général de l'ordre de 1,0 à 1,5 million d'euros pour un four d'une capacité de 50-100 tonnes/jour (doté de filtres à sac ou de précipitateurs électrostatiques) et de 2,5 à 3,5 millions d'euros pour un four d'une capacité de 500 tonnes/jour (généralement dotés de précipitateurs électrostatiques). Les coûts d'exploitation annuels sont compris entre 50 000 et 250 000 euros si le sous-produit est réutilisé dans le processus de fusion (il faut alors que la couleur soit homogène). Le coût d'élimination des sous-produits est très élevé et peut doubler ces coûts d'exploitation. Le coût d'équipement de l'installation d'un système de traitement au point de rejet est généralement plus élevé pour les usines existantes que pour les nouvelles usines, en particulier si l'espace disponible est limité.

⁴ Bien que les filtres à sac soient efficaces à faible température, il est crucial de contrôler cette température pour éviter la corrosion acide provoquée par une température basse et pour assurer que l'intégrité du filtre n'est pas compromise par la destruction thermique causée par des températures excessivement élevées. De plus amples informations sur le champ d'application des techniques de contrôle des MP et les résultats obtenus figurent dans les Directives EHS générales.

dans la composition et l'oxydation de l'azote contenu dans les combustibles. Les modifications qui peuvent être apportées au processus primaire résultent généralement de l'application d'une ou plusieurs des techniques suivant : abaissement du ratio air/combustible, combustion étagée, brûleurs scellés et à faible dégagement de NO_x, et du combustible utilisé. Il est aussi possible et efficace de faire fonctionner les fours dans des conditions quelque peu réductrices.

Il est important de réduire le plus possible l'entrée d'air dans la chambre de combustion des fours pour accroître leur rendement énergétique et limiter la formation de NO_x. Il est généralement recommandé de maintenir un pourcentage de 0,7 à 1 % de O₂ dans les fours à flamme à récupérateur et de 1 à 2 % de O₂ dans les fours à boucle, mesuré à la sortie de la chambre de combustion, et de contrôler le niveau de monoxyde de carbone (CO) qui doit être maintenu à un niveau aussi bas que possible (CO maximum compris entre 200–300 ppm et 1 000 ppm).

D'autres mesures de traitement primaire peuvent être envisagées, elles consistent à utiliser des fours à oxy-combustible (dans lesquels la combustion s'effectue uniquement ou en partie avec du O₂) comme expliqué à l'annexe A, et à opter pour des fours⁵ qui dégagent peu de NO_x.

Des techniques de dépollution (secondaires) au point de rejet doivent être employées pour réduire les émissions de NO_x des procédés de fabrication du verre lorsque les mesures primaires

⁵ Certains nouveaux modèles de fours de fusion sont conçus de manière à offrir diverses options pour réduire les émissions de NO_x. Les fours à faible émission de NO_x et les fours FlexMelter se caractérisent par une production à contre-courant des gaz résiduaire dans un espace du four qui est séparé de l'aire de combustion pour créer les conditions d'une « combustion par étage ». Le processus du « système en cascade », qui est une autre technique, intervient dans l'orifice de combustion. Une précombustion différentielle d'une partie du combustible se produit avant la phase finale de la combustion, permettant une combustion avec de l'air comburant qui contient un pourcentage plus faible de O₂. Ce type de technologie est habituellement plus coûteux que les méthodes de combustion traditionnelles et doit être comparé avec les coûts et l'efficacité des autres fours de conception standard qui ont des systèmes de réduction de la pollution au point de rejet.

ne permettent pas de ramener les niveaux de NO_x aux valeurs requises, à savoir :

- procédé de réduction chimique par introduction d'un carburant (p. ex., le procédé 3R) ;
- procédé de réduction catalytique sélective.

Le procédé de réduction sélective non catalytique n'est pas couramment employé dans l'industrie du verre. Des informations supplémentaires sur le champ d'application et la performance des procédés de maîtrise des émissions de NO_x sont présentées dans les Directives EHS générales.

Oxydes de soufre

La présence d'oxydes de soufre (SO_x) dans les gaz résiduaux des fours des verreries dépend de la teneur en soufre du combustible et de la teneur en sulfite / sulfate / sulfure des matières premières et, en particulier, de l'ajout de sulfate de sodium ou de calcium pour l'oxydation du verre.

Les techniques de dépollution recommandées pour réduire les émissions d'oxydes de soufre (SO₂) consistent, notamment, à :

- utilisation de combustibles à faible teneur en soufre comme, en particulier, le gaz naturel ;
- réduction des quantités de sulfate de sodium ou de calcium dans les compositions.

En général, lorsque le gaz naturel est utilisé comme combustible, les niveaux de SO_x dans les gaz d'échappement sont faibles. S'il est souhaitable de réduire davantage les émissions de gaz acide, par exemple lorsqu'un combustible à base de soufre est employé, il est possible de recourir à des méthodes qui consistent à :

- utiliser des épurateurs par voie sèche qui injectent des matières à base de calcium ou de sodium⁶ dans les gaz de combustion avant de filtrer le gaz résiduaire ;
- installer des épurateurs par voie semi-humide (épurateurs utilisant des réactifs ou des réactifs d'arrosage) qui donnent lieu à l'addition de produits chimiques réactifs basiques (à base de calcium et de sodium) qui sont dissous dans l'eau de lavage (réduction par voie humide).

Lorsqu'un processus d'absorption par voie sèche est utilisé (dans les opérations de réduction de SO₂ et/ou de chlorure d'hydrogène [HCl] ou de fluorure d'hydrogène [HF] au moyen de bicarbonate de soude [NaHCO₃] ou de chaux éteinte [Ca(OH)₂]), les filtres à sac sont généralement plus efficaces que les précipitateurs électrostatiques parce qu'ils ont une surface de contact importante et que la durée du contact entre solides et gaz est longue.

Chlorures et fluorures

Ces polluants, qui apparaissent — généralement en quantités limitées — dans les gaz résiduaux des fours utilisés pour fondre le verre, proviennent des impuretés présentes dans les matières premières. Les principales exceptions concernent la fabrication du verre opale (opaque) et la fabrication des fibres de verre continue, pour lesquelles le niveau de gaz fluor / HF avant réduction peut atteindre 1 000 mg/Nm³ ou plus, en raison de l'addition de spath-fluor à la composition. Des techniques d'épuration par voie sèche et semi-sèche sont généralement utilisées pour traiter les émissions de HF. Lorsque le verre est

⁶ Le composé de sodium le plus souvent utilisé est le bicarbonate de sodium (NaHCO₃) qui est employé sous forme sèche dans le procédé NEUTREC. Le NaHCO₃ est écrasé dans un moulin pour atteindre une taille inférieure à 15 µm puis il est ajouté au flux de gaz résiduaux. À une température supérieure à 107°C (généralement au-dessus de 140°C), le NaHCO₃ se décompose en carbonate de sodium (Na₂CO₃) et en eau. La capacité de réaction du Na₂CO₃ « natif » à large surface avec des composés acides est élevée. Cette réactivité réduit la quantité de produits chimiques réactifs et, par conséquent, celle de sous-produits.

particulièrement agressif (p. ex. l'opale en raison de la présence de fluor), il est jugé préférable d'utiliser un four électrique.

Sauf en ce qui concerne la fabrication de verres spéciaux, les sources d'émissions de HCl et de HF sont généralement les impuretés contenues dans les matières premières (p. ex., sodium ou chlorure de calcium) et, parfois, la présence d'une petite quantité de fluorure de calcium (CaF₂) dans la composition. Les émissions de HF et de HCl peuvent toutes deux être maîtrisées par les techniques de réduction des émissions de SO₂ décrites ci-dessus.

Métaux

Les émissions contenant des métaux posent un problème important dans certains sous-secteurs (p. ex., comme la production de cristal au plomb et de fritte) ; elles se produisent toutefois, dans toutes les autres activités de fabrication du verre, bien dans une moindre mesure. Des métaux lourds peuvent se trouver sous forme d'impuretés mineures dans certaines matières premières, dans le calcin et dans les combustibles. Le plomb et le cadmium sont utilisés dans les fondants et les agents colorants qui sont employés dans la fabrication de frites. Dans le cas du cristal au plomb, les particules peuvent avoir une teneur en plomb comprise entre 20 et 60 %. Certaines fabriques de verre peuvent rejeter de l'arsenic, de l'antimoine et du sélénium (agent colorant du verre bronze ou agent décolorant de certains verres transparents).

Des techniques de réduction de la poussière extrêmement efficaces doivent être utilisées pour réduire les émissions de particules contenant du métal. L'installation d'épurateurs par voies sèche et semi-sèche conjuguée à l'application de techniques de réduction de la poussière permettent de limiter les émissions gazeuses renfermant du métal.

Gaz à effet de serre (GES)

La fabrication du verre produit une quantité significative de gaz à effet de serre (GES), notamment de gaz carbonique (CO₂). La production d'1 kg de verre dans un four alimenté au gaz génère environ 0,6 kg de CO₂, dont 0,45 kg provient de la combustion des combustibles fossiles et 0,15 kg de la dissociation de la matière première de carbonate (CaCO₃ et dolomie) utilisée dans la composition. La production de GES est directement liée au type de verre, au type de combustibles fossiles utilisés, au rendement énergétique du processus et à l'utilisation de calcin. En raison de la haute qualité exigée pour certains produits en verre (p. ex., les produits pharmaceutiques et cosmétiques, les produits de laboratoire et d'éclairage) les possibilités d'utilisation de calcin sont limitées.

En plus des stratégies recommandées pour gérer les émissions de GES qui sont présentées dans les Directives EHS générales, diverses mesures adaptées à la fabrication du verre peuvent être adoptées pour prévenir et maîtriser les émissions de GES, qui consistent, notamment, à :

- chercher à accroître le rendement énergétique (comme indiqué ci-après) ;
- employer des combustibles à faible teneur en carbone (comme le gaz naturel, si possible, au lieu du fioul ou de combustibles fossiles solides) ;
- utiliser la quantité la plus élevée possible de calcin pour accroître le rendement énergétique et limiter l'utilisation des matières premières de carbonate, en particulier pour la production de verre creux. La fabrication de verre creux vert se prête particulièrement bien à l'utilisation d'une grande quantité de calcin. La consommation d'énergie par le four diminue généralement 0,15 à 0,3 % pour chaque

point de pourcentage de calcin entrant dans la composition⁷.

- installer des ventilateurs dotés de systèmes de contrôle avec invertisseur et variateur de vitesse pour l'air de combustion et pour le refroidissement de l'air.
- récupérer la chaleur du gaz d'échappement du four : cette chaleur peut servir à préchauffer la composition ou le calcin (voir ci-après) ou fournir de la chaleur ou de la vapeur pour chauffer les locaux. Un procédé est en cours de mise au point, qui permettra de récupérer la chaleur sous la forme de vapeur à haute pression en vue de la détente dans une turbine et de générer de l'électricité.
- améliorer le rendement des fours en agissant sur les aspects suivants⁸ :
 - *taille du four* : les fours qui ont une capacité de production nominale inférieure à 50 tonnes / jour affichent des pertes structurelles élevées par rapport à l'énergie utilisée pour fondre le verre et sont donc inefficaces ;
 - *choix des techniques de fusion* : Les fours à régénérateur ont une meilleure performance énergétique que les fours à récupérateur car ils préchauffent l'air de combustion à des températures plus élevées ;
 - adoption de techniques et de matériaux d'isolation améliorés ;
 - mesures de contrôle de la combustion ;
 - utilisation de calcin dans toute la mesure du possible ;
 - préchauffage de la composition et du calcin avant leur entrée dans le four grâce à la chaleur résiduaire des gaz d'évacuation du four qui a été récupérée.

⁷ Au sein de l'Union européenne (UE), l'utilisation de calcin pour la production de verre creux varie entre < 20 % et > 90 % et entre 25 – 60 % pour le verre ambré ; la moyenne pour l'UE est de 48 %.

⁸ UE BREF (2001).

Eaux usées

Eaux usées industrielles

L'eau est principalement utilisée pour le refroidissement et le lavage du calcin. Les effluents se composent des eaux provenant de la purge du circuit d'eau de refroidissement par contact, des eaux de lavage et des eaux de ruissellement. Il est recommandé d'utiliser des systèmes en circuit fermé pour réduire le plus possible la perte d'eau. Les quantités d'effluents liquides rejetées par les fabriques de verre sont minimales par rapport à celles d'autres installations industrielles, et ne sont dues qu'à des processus déterminés (comme le refroidissement de la paraison chaude ou le refroidissement à l'eau des ciseaux de découpe de la paraison). Les effluents rejetés peuvent être contaminés par des solides en verre, certains matériaux solubles employés pour la fabrication du verre (comme le sulfate de sodium), certains composés organiques dus à l'utilisation d'huiles lubrifiantes dans le processus de découpe, et des produits chimiques de traitement (par ex., des sels dissous et des produits chimiques) utilisés pour traiter l'eau du circuit de refroidissement.

Traitement des eaux usées industrielles

Différentes techniques sont utilisées pour traiter les eaux industrielles dans cette branche d'activité, qui consistent notamment à séparer les huiles et l'eau ; à régulariser le flux et la charge des eaux par rectification du pH ; à réduire la quantité de matières solides en suspension par sédimentation dans des bassins de décantation ou des clarificateurs ; à filtrer l'eau sur plusieurs milieux pour réduire la quantité de matières solides non décantables ; à assécher les résidus et à les déposer dans une décharge ou, s'ils sont dangereux, à les déposer dans des sites désignés pour la mise au rebut des déchets dangereux. Il est possible que des contrôles d'ingénierie et des processus de prétraitement supplémentaires soient nécessaires pour enlever de l'eau des circuits de refroidissement par contact les métaux,

les sels dissous, les produits organiques et les produits chimiques de traitement de l'eau.

La gestion des eaux industrielles est traitée dans les Directives EHS générales, qui présentent des exemples de modes de traitement. En ayant recours à ces technologies et en suivant les bonnes pratiques en matière de gestion des eaux usées, les installations devraient satisfaire aux Directives pour les valeurs des décharges des eaux usées portées dans le tableau pertinent de la Section 2 du document pour cette branche d'activité. Les opérations de traitement mécanique du verre doivent donner lieu au recyclage des eaux industrielles.

Autres eaux usées et consommation d'eau

Les directives sur la gestion des eaux usées non contaminées provenant des équipements sanitaires, des eaux de pluies non contaminées, et des eaux d'égout sont présentées dans les Directives EHS Générales. Les écoulements d'eau contaminée doivent être acheminés de manière à passer par le système de traitement des eaux usées industrielles. Des recommandations pour réduire la consommation d'eau, en particulier dans les sites où les ressources naturelles en eau sont limitées, sont fournies dans les Directives EHS Générales.

Déchets solides

Les déchets solides que produisent la plupart des activités de fabrication de verre sont relativement peu importants. Ils proviennent principalement des zones de réception. Le nettoyage et la maintenance de ces zones peuvent réduire la quantité de déchets générée et récupérer les matières premières accidentellement déversées pour les rajouter aux stocks. Lorsque les aires de réception sont dallées, le recouvrement de ces déversements et le nettoyage de la zone peuvent être accomplis de manière efficace et les matières déversées peuvent aussi être correctement identifiées, séparées et recyclées à l'intérieur du processus de fabrication.

Les résidus solides issus du processus de fusion sont la poussière des régénérateurs (ou des récupérateurs) qui est enlevée lors du nettoyage mécanique ou thermique, et les déchets de matériaux réfractaires produits lors des activités de maintenance périodique, de réparation et de fermeture du four (entre 500 et 2 000 tonnes de déchets peuvent être recouverts dans le cadre de ces opérations qui sont généralement menées les 5 à 15 ans), y compris des réfractaires riches en chrome et zirconium. Les autres déchets sont la poussière collectée dans les dispositifs de dépollution.

Les opportunités à saisir pour prévenir la pollution consistent, notamment, à :

- utiliser du calcin dans toute la mesure du possible comme produit de base ;
- recycler les déchets réfractaires comme produit de base dans la fabrication des briques (la qualité du produit final ne s'en trouve pas modifiée) ;
- remplacer les briques réfractaires en général tous les 6 à 12 ans (un bon recyclage de ces matériaux offre une opportunité de prévenir une source de pollution et la méthode à suivre à cette effet doit être définie lorsque les travaux de reconstruction et de réparation du four / de l'avant-corps sont entrepris) ;
- réutiliser la poussière collectée dans la composition, si sa couleur le permet.

1.2 Hygiène et sécurité au travail

Les risques les plus importants en matière d'hygiène et de sécurité au travail interviennent pendant les opérations de fabrication du verre et rentrent principalement dans les catégories suivantes :

- Risques dus à une exposition à la chaleur
- Risques auditifs

- Risques respiratoires
- Risques corporels
- Risques dus à l'électricité

Risques dus à une exposition à la chaleur

Les travailleurs sont principalement exposés à la chaleur durant l'exploitation et l'entretien des fourneaux et autres matériels extrêmement chauds. Les techniques recommandées pour prévenir et lutter contre cette exposition consistent à :

- réduire le temps de travail dans les environnements à haute température (par ex. en raccourcissant la durée de travail aux postes en question) ;
- assurer une ventilation adéquate de l'atelier et la circulation d'air refroidi pour éloigner les fumées et la poussière des postes de travail et éviter une température excessive aux postes de travail ;
- fournir et utiliser, autant que possible, des respirateurs alimentés en air ou en O₂ ;
- installer des revêtements de protection sur les surfaces chaudes à proximité desquelles les ouvriers travaillent et utiliser un équipement de protection individuel (EPI) si nécessaire, notamment des gants et des chaussures thermo-isolants.

Risques auditifs

Les travailleurs peuvent être exposés au bruit pendant la fabrication du verre. La perte d'ouïe (hypoacousie) est une maladie professionnelle courante dans cette branche d'activité, en particulier dans la fabrication de verre creux. Durant le processus de formation du verre creux, la forte pression qui se manifeste existe lors du refroidissement et du moulage peut produire des émissions de bruit importantes. Le bruit produit par les presses qui compriment le verre peut dépasser 100 décibels et peut entraîner une perte auditive. Les Directives EHS générales fournissent des recommandations pour prévenir et

maîtriser l'exposition au bruit, notamment par le port de protecteurs d'oreilles et d'autres EPI.

Risques respiratoires

(Exposition à la poussière, aux fumées et à des composés toxiques)

Les risques qui se posent au plan de l'hygiène dans le cadre de la fabrication du verre peuvent tenir à la présence, sur les lieux de travail, de fines particules en suspension dans l'air. Ces matières particulaires peuvent contenir de la farine de quartz, qui provient des sables au silicate et du feldspath et, parfois, des composés toxiques (tels qu'oxyde de plomb, bore, arsenic, étain, nickel, cobalt). Dans les usines de fabrication de verre creux et de vaisselle, les travailleurs sont aussi généralement exposés aux vapeurs et aux fumées dégagées par les produits utilisés pour lubrifier les moules à chaud. Les particules provenant de la fabrication du cristal au plomb peuvent avoir une teneur en plomb de 20 à 60 %. Certains processus de fabrication de verres spéciaux peuvent générer des niveaux élevés de HCl, de HF, d'arsenic, d'antimoine et de sélénium sur les lieux de travail.

Le traitement des surfaces chaudes peut faire intervenir des composés d'étain et de titane, comme le chlorure d'étain ou les composés organiques chlorés de l'étain, et ces composés peuvent générer des émissions de poussière riches en étain, titane et HCl. Les techniques recommandées pour prévenir et maîtriser les expositions à des risques respiratoires consistent, notamment, à :

- isoler les aires de stockage et l'atelier de composition des autres zones d'opérations ;
- adopter de bonnes pratiques de chargement et de déchargement ;
- transporter jusqu'aux fours dans des convoyeurs ou des tubes fermés les matières premières utilisées pour la composition ;

- utiliser des systèmes de ventilation.

Risques corporels

Les blessures aux yeux qui peuvent être causées par des particules de verre brisé ou volantes sont un risque qui existe pour toutes les activités liées à la fabrication du verre. Il importe de les éviter en veillant à ce que tous les travailleurs et visiteurs portent des lunettes de sécurité. Des coupures graves peuvent se produire lorsque du verre plat se brise pendant les opérations de manutention. Il importe de réduire le plus possible le risque de blessure en automatisant la manipulation du verre plat et en fournissant des gants résistant aux coupures et des tabliers longs aux ouvriers qui manipulent le verre plat.

Risques électriques

Les travailleurs peuvent être exposés à des risques électriques car le matériel électrique est présent partout dans les établissements de fabrication du verre. Les Directives EHS générales fournissent des recommandations en matière de prévention et de contrôle de l'exposition aux risques électriques.

1.3 Santé et sécurité de la population

Les impacts sur la santé et la sécurité de la population pendant la construction, l'exploitation et le démantèlement des usines de fabrication du verre sont identiques à ceux de la plupart des grands établissements industriels et sont examinés dans les Directives EHS générales.

2.0 Indicateurs de performance et suivi des résultats

2.1 Environnement

Directives pour les émissions et les effluents

Les tableaux 1 et 2 présentent des directives en matière d'effluents pour la branche d'activité concernée. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur

des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents, et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré. Ces directives sont réalisables, sous des conditions d'exploitation normales, dans les établissements conçus et exploités de manière appropriée, c'est-à-dire en appliquant les techniques de prévention et de contrôle examinées dans les sections précédentes du présent document. Ces niveaux doivent être atteints, en toute rigueur, au moins 95 % du temps pendant lequel l'usine ou l'unité fonctionne, proportionnellement aux heures annuelles d'exploitation. L'écart par rapport à ces niveaux qui tiennent des conditions spécifiques et locales d'un projet doit être justifié dans l'évaluation environnementale.

Les directives en matière d'effluents sont applicables aux rejets directs des effluents traités dans les eaux de surface destinées à une utilisation générale. Les niveaux de rejets propres à un site donné peuvent être établis lorsqu'il existe des systèmes de collecte et de traitement des eaux usées gérés par le secteur public, selon les conditions dans lesquelles ils sont utilisés, ou dans le cas de rejets directs dans les eaux de surface, selon la classification de l'utilisation des eaux réceptrices telle qu'elle est décrite dans les Directives EHS générales.

Les directives relatives aux émissions s'appliquent aux émissions inhérentes au processus de production. Les directives concernant les émissions produites par les opérations de combustion associées aux activités de cogénération de centrales ayant une puissance installée ne dépassant pas 50 MW figurent dans les Directives EHS générales ; les émissions des centrales électriques de plus grande taille sont présentées dans les Directives EHS pour l'électricité thermique. Des informations sur les conditions ambiantes basées sur la charge totale des émissions sont présentées dans les Directives EHS générales.

Suivi des impacts environnementaux

Des programmes de suivi des impacts environnementaux doivent être mis en place de manière à couvrir toutes les activités qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions normales ou anormales d'exploitation. Les activités de suivi des impacts environnementaux doivent être basées sur des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents, et d'utilisation des ressources applicables au projet considéré.

Les activités de suivi doivent être suffisamment fréquentes pour fournir des données représentatives sur les paramètres considérés. Elles doivent être menées par des personnes ayant reçu la formation nécessaire à cet effet, suivant des procédures de suivi et de tenue des statistiques et utilisant des instruments correctement calibrés et entretenus. Les données produites par les activités de suivi doivent être analysées et examinées à intervalles réguliers et comparées aux normes d'exploitation afin de permettre l'adoption de toute mesure corrective nécessaire. De plus amples informations sur les méthodes d'échantillonnage et d'analyse des émissions et des effluents applicables figurent dans les Directives EHS générales.

Tableau 1. Niveaux des émissions atmosphériques — fabrication du verre

Polluants	Unités	Valeur données dans les directives
Particules Gaz naturel Autres combustibles	mg/Nm ³	100 ^a 50 ^a
SO ₂	mg/Nm ³	700–1 500 ^b
NO _x	mg/Nm ³	1 000
HCl	mg/Nm ³	30
Fluorures	mg/Nm ³	5
Plomb	mg/Nm ³	5

Cadmium	mg/Nm ³	0,2
Arsenic	mg/Nm ³	1
Autres métaux lourds (total)	mg/Nm ³	5 ^c

^a Lorsque des métaux toxiques sont présents, ne pas dépasser 20 mg/Nm³. Pour que les émissions de poussière ne dépassent pas 50 mg/Nm³, il est nécessaire de mettre en place des traitements secondaires (filtres à sac ou précipitateurs électrostatiques). De bonnes conditions d'exploitation du four et l'adoption de mesures primaires peuvent permettre d'atteindre des niveaux d'émissions de 100 mg/Nm³.

^b 700 mg/Nm³ pour le chauffage au gaz naturel. 1 500 mg/Nm³ pour le chauffage au mazout

^c 1 mg/Nm³ pour le sélénium

Tableau 2. Niveaux des effluents — fabrication du verre

Polluants	Unités	Valeurs données dans les directives
pH	S.U.	6–9
Nombre total de matières solides en suspension	mg/L	30
DCO	mg/L	130
Huiles et graisses	mg/L	10
Plomb	mg/L	0.1
Antimoine	mg/L	0.3
Arsenic	mg/L	0.1
Fluorures	mg/L	5
Anhydride borique	mg/L	2
Augmentation de température	°C	<3 ^a

^a À la limite d'une zone de mélange établie scientifiquement qui tient compte de la qualité de l'eau ambiante, de l'utilisation des eaux réceptrices, des récepteurs potentiels et de la capacité d'assimilation

Utilisation des ressources et charges des émissions

Les tableaux 3 et 4 fournissent des exemples d'indicateurs de consommation des ressources en matière d'énergie et d'eau, en plus des charges des masses d'émissions pour la branche d'activités à l'étude. Les valeurs de référence de l'industrie sont fournies à titre comparatif uniquement avec pour objectif l'amélioration continue de chacun des projets.

^a La consommation d'énergie spécifique est étroitement liée aux dimensions et à l'âge du four, à sa capacité de production de verre, à la méthode de chargement et à l'utilisation de calcin. Les fours de petite taille et ceux qui fonctionnent à une capacité inférieure à leur capacité nominale ont généralement un moins bon rendement énergétique parce que les pertes de chaleur spécifiques sont élevées. La consommation d'énergie dépend également de la qualité du verre (température de fusion), du pourcentage de calcin et de l'âge du four. La valeur minimale indiquée est réalisable avec les nouveaux fours, moyennant un apport optimal de calcin, une bonne isolation du four et de bonnes conditions d'exploitation (p. ex., des températures opérationnelles non excessives et un bon contrôle de la combustion). Les chiffres indiqués pour la consommation de combustible reposent sur l'hypothèse que le chauffage n'inclut pas un chauffage électrique de pointe. Les chiffres sur la consommation d'électricité ne comprennent pas non plus l'utilisation directe d'électricité pour la fusion, mais ils tiennent compte de son utilisation pour le fonctionnement des ventilateurs utilisés pour évacuer l'air de combustion.

^b Les consommations d'énergie spécifiques pour les fours à régénération et les fours oxy-combustible sans production de O₂ et pour la production de verre creux sont plus faibles que les consommations des fours à récupération et que pour la production du verre plat et de la vaisselle.

^c Valeurs indiquées pour la fabrication de fibres de verre

^d Dans la fabrication du verre à la chaux sodée, une augmentation de 10 % de la quantité de calcin permet de réduire la consommation d'énergie a de jusqu'à 3 % qui est alors comprise entre 22 et 30 kcal/kg (0,09 – 0,13 GJ/tonne).

Table 3. Consommation de ressources et d'énergie^{a,d}

Intrants par unité de produit	Unité	Référence pour cette branche d'activité
Combustibles Consommation de combustibles spécifique pour les fours à boucle à régénération pour la fabrication de verre creux produisant > 200 tonnes/jour	GJ/tonne verre fondu	3,9 ^b
Consommation de combustible spécifique pour les fours à verre flotté (pour le verre plat) produisant 400–500 tonnes/jour	GJ/tonne verre fondu	5,5
Consommation de combustible spécifique pour les unités de fusion du verre borosilicate produisant 10–15 tonnes/jour	GJ/tonne verre fondu	9
Électricité Consommation électrique	kWh/tonne verre fondu	110
Eau Consommation d'eau par unité de production	M ³ /tonne verre fondu	4 ^c

Tableau 4. Génération des charges polluantes			
Extrants par unité de produit ^a	Unité	Référence pour cette branche d'activité	
		Fours verre plat	Fours verre creux
Matières particulaires	kg/tonne de verre fondu	0,02–0,1	0,002–0,22
	mg/Nm ³	5,0–40	1–35
NO _x	kg/tonne de verre fondu	1,1–2,9	<0,75
	mg/Nm ³	495–1,250	<400
SO _x	kg/tonne de verre fondue	0,54–4,0	0,2–3,5
	mg/Nm ³	200–1,700	100–1,650
HCl	kg/tonne de verre fondue	<0,01–0,08	0,01–0,07
	mg/Nm ³	4,0–30	7–30
HF	kg/tonne de verre fondue	<0,002–0,01	≤0,02
	mg/Nm ³	<1,0–4,0	≤1–6
Métaux	kg/tonne de verre fondue	<0,001	<0,001
	mg/Nm ³	<1,0	<1,0

^a Données fournies par l'Union européenne (2005) pour des techniques de dépollution primaires et secondaires. Les données couvrent aussi bien les fours alimentés en gaz que les fours alimentés au mazout.

2.2 Hygiène et sécurité au travail

Directives sur l'hygiène et la sécurité au travail

Les résultats obtenus dans le domaine de l'hygiène et de la sécurité au travail doivent être évalués par rapport aux valeurs limites d'exposition professionnelle publiées à l'échelle internationale, comme les directives sur les valeurs limites d'exposition (TLV®) et les indices d'exposition à des agents biologiques (BEIs®) publiés par American Conference of

Governmental Industrial Hygienists (ACGIH),⁹ *Pocket Guide to Chemical Hazards* publié par United States National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH),¹⁰ les valeurs plafonds autorisées (PELs) publiées par Occupational Safety and Health Administration of the United

States (OSHA),¹¹ les valeurs limites d'exposition professionnelle de caractère indicatif publiées par les États membres de l'Union européenne,¹² ou d'autres sources similaires.

Fréquence des accidents mortels et non mortels

Il faut s'efforcer de ramener à zéro le nombre d'accidents du travail dont peuvent être victimes les travailleurs (employés et sous-traitants) dans le cadre d'un projet, en particulier les accidents qui peuvent entraîner des jours de travail perdus, des lésions d'une gravité plus ou moins grande, ou qui peuvent être mortels. Les chiffres enregistrés pour les installations des projets considérés doivent être comparés à ceux des installations de pays développés opérant dans la même branche d'activité, présentés dans des publications statistiques (par exemple US Bureau of Labor Statistics et UK Health and Safety Executive)¹³.

Suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail

Il est nécessaire d'assurer le suivi des risques professionnels liés aux conditions de travail spécifiques au projet considéré. Ces activités doivent être conçues et poursuivies par des experts agréés¹⁴ dans le contexte d'un programme de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies,

⁹ Consulter: <http://www.acgih.org/TLV/> et <http://www.acgih.org/store/>

¹⁰ Consulter: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹¹ Consulter: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992

¹² Consulter: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oe/

¹³ Consulter: <http://www.bls.gov/iif/> and <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

¹⁴ Les professionnels agréés peuvent être des hygiénistes industriels diplômés, des hygiénistes du travail diplômés, des professionnels de la sécurité brevetés ou tout titulaire de qualifications équivalentes.

des événements dangereux et autres incidents. De plus amples informations sur les programmes de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail sont données dans les Directives EHS générales.

3.0 Bibliographie et sources d'information supplémentaires

Australian Government. Department of the Environment and Heritage. 2004. Emissions Estimation Technique Manual for Glass and Glass Fibre Manufacturing — Version 2.0. Canberra, Australie.

Commission européenne. 2001. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry. Seville, Espagne.

Eurosil. 2005. Potential Socio-Economic Effects of Setting an EU Occupational Exposure Limit for Respirable Crystalline Silica.

Organisation internationale du travail (OIT). 2001. Safety in the Use of Synthetic Vitreous Fibre Insulation Wools. Genève, Suisse.

State of New Jersey, Department of Environmental Protection, Air Quality Permitting Program. 1997. State of the Art (SOTA) Manual for the Glass Industry Section 3.15. Trenton, New Jersey.

UNECE/EMEP Task Force on Emission Inventories and Projections. 2005. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook — 2005. Glass Production. Activities 030314-030317 & 040613. Agence européenne pour l'environnement. Copenhague, Danemark.

Union européenne. 2005. Corinair. Emission Inventory Guidebook.

US Department of Labor, Bureau of Labor Statistics. 2003 and 2004. Nonfatal Occupational Injuries and Illnesses for Glass and Glass Product Manufacturing (Code 327200) and for Glass Container Manufacturing (Code 327213). Washington.

US Environmental Protection Agency (US EPA). 2005. Standards of Performance for New Stationary Sources. Subpart CC – Standards of Performance for Glass Manufacturing Plants, 40 CFR Part 60. Washington

US EPA, Office of Compliance. 1995b. Profile of the Stone, Clay, Glass and Concrete Products Industry. Sector Notebook Project. Washington.

US EPA. 1995. 40 CFR Part 426. Glass Manufacturing Point Source Category. Subpart H – Glass Container Manufacturing Subcategory, 40 CFR Part 426. Washington.

US EPA. 1995a. AP-42 Section 11.15, Glass Manufacturing. Washington.

US EPA. 1995c. Glass Manufacturing Point Source Category. Subpart E – Float Glass Manufacturing Subcategory 40 CFR Part 426. Washington.

US EPA. 2004. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants. Subpart N – National Emission Standards for Inorganic Arsenic Emissions from Glass Manufacturing Plants, 40 CFR Part 61. Washington.

Annexe A: Description générale de la branche d'activité

La branche d'activité du verre regroupe divers types de fabriques de verre et de produits. Elle produit des articles en verre à partir d'une large gamme de matières premières, dont les plus importantes sont le sable siliceux, le calcin et des intermédiaires / modificateurs comme la soude, le calcaire, la dolomie et le feldspath. La disponibilité des matières premières est un élément important qu'il importe de prendre en compte lors de la conception de l'usine et du choix du site. Les grandes quantités de matières premières peu onéreuses nécessaires et la valeur spécifique relativement faible des produits manufacturés sont des facteurs fondamentaux de la détermination d'un emplacement approprié de l'usine qui doit permettre de réduire les distances sur lesquelles doivent être transportées non seulement les principales matières premières mais aussi les produits des fabriques. Cela est particulièrement important dans le cas de la production de verre creux qui est le secteur le plus important de cette branche d'activité.

Plus de 90 % des produits fabriqués sont vendus à d'autres entreprises industrielles. La fabrication du verre est largement dépendante du secteur de la construction de bâtiments, de la construction automobile et de l'industrie des aliments et des boissons. Cependant, d'autres types d'opérations produisent des articles de consommation ou des articles techniques de valeur élevée en quantités plus limitées. La branche des verres spéciaux produit une gamme d'articles tels que tubes cathodiques et pour rayons X, verrerie d'éclairage (tubes et ampoules), verrerie pour l'électronique et l'électrotechnique, isolateurs et joints d'étanchéité en verre, verre borosilicate (verrerie de laboratoire et produits de cuisson), vitrocéramique, verre optique, verre expansé, brique de verre et verrerie artistique.

Une fois que le sable, le calcaire, la soude et les autres matières premières ont été réceptionnés, ils sont entreposés

dans des conteneurs distincts. Avant d'être fondues, les matières premières sont transférées vers un système de pesée et de brassage où elles sont mélangées avec du calcin pour garantir l'homogénéité requise. La composition est alors placée dans un conteneur de stockage tampon en attendant qu'il soit utilisé pour alimenter le four de fusion. Le four de fusion chauffe les matières premières à des températures comprises entre 1 500°C et 1 650°C, qui, sous l'effet d'une série de réactions chimiques, provoquent la fusion des matières en verre. Le verre fondu est « tiré » hors du four et subit un conditionnement thermique dans « l'avant-corps » pour assurer les meilleures caractéristiques de modelage possibles pour les phases de travail successives. Après le processus de formage, le verre est recuit dans « l'étenderie » qui permet de relâcher les contraintes physiques causées par le formage. Les produits obtenus passent alors à la phase de l'inspection et des tests. L'ultime phase, celle de l'emballage, prépare le produit fini pour son stockage ou son transport. Un processus de fabrication du verre type est présenté dans la figure 1-A.

Matières premières

Les différents sous-secteurs du verre et les différentes fabriques emploient une large gamme de matières premières. Les principales sont les matières de base entrant dans la composition du verre (sable siliceux, calcin, etc.), les intermédiaires / modificateurs (soude, calcaire, feldspath, dolomie, etc.) et les agents colorants / décolorants (chromites, oxyde de fer, oxyde de cobalt, sélénium, sélénite de zinc, etc.). Les fabriques de verres spéciaux et techniques utilisent aussi de l'oxyde de plomb, de la potasse, de l'oxyde de zinc et d'autres oxydes métalliques. Les agents d'affinage englobent l'arsenic et l'oxyde d'antimoine, les nitrates et les sulfates. Trois ou quatre matières premières constituent plus de 95% des matières premières utilisées pour la fabrication du verre (sable, soude, calcaire et dolomie), mais plusieurs autres sont utilisées

dans la composition, comme matériaux intermédiaires et modifiants et comme agents colorants.

Consommation d'énergie et combustibles

La fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie ; il est donc essentiel d'adopter des mesures de conservation de l'énergie, en particulier lors de la conception des unités de fusion. Le processus de fusion est la phase qui consomme le plus d'énergie puisque entre 60 et 80 % de la consommation totale d'énergie par la fabrication du verre lui sont imputables. Les caractéristiques du four (en particulier le type et la taille) ont un impact sur la performance énergétique spécifique. Les autres sources de consommation d'énergie sont les avant-corps, le processus de formage, la cuisson et le chauffage des locaux. Les ventilateurs utilisés pour évacuer l'air de combustion et pour refroidir l'air consomment beaucoup d'électricité. L'adoption de mesures pour réduire le poids des produits, en particulier les verres creux, permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions atmosphériques par produit unitaire. Ces mesures peuvent consister à optimiser la conception de l'usine et le processus de formage et à mettre en œuvre des traitements de post-formage.

Le processus de fusion

La source d'énergie, la technique de chauffage et la méthode de récupération de la chaleur sont des aspects cruciaux de la conception d'un four de fusion du verre. Elles comptent parmi les facteurs déterminants les plus importants de la performance environnementale et du rendement énergétique de l'opération de fusion et, par conséquent, du rendement énergétique du processus de production du verre dans son ensemble. Les fours de fusion du verre sont classés en quatre catégories, en fonction de leur source de combustible et de la méthode d'utilisation de la chaleur: four à régénérateur, four à récupérateur, four à flamme à récupérateur et four électrique. Les fours à récupérateur, les fours à régénérateur et les fours à

flamme à récupérateur peuvent être alimentés au gaz, au fioul ou au moyen de combustibles solides pulvérisés. Les combustibles utilisés ont un impact important en termes d'émissions de GES, de particules et de SO₂. La sélection des combustibles doit s'effectuer compte dûment tenu des aspects environnementaux du site de l'usine.

Fours à régénérateur

Ces fours utilisent des systèmes de récupération de chaleur constitués par une paire de régénérateurs qui préchauffent l'air de combustion. Les brûleurs sont généralement placés dans les orifices de l'air de combustion / des gaz résiduels ou sous ces orifices. Les brûleurs ne fonctionnent que d'un seul côté à chaque stade de l'opération. Les gaz chauds évacués du four chauffent les matériaux réfractaires dans la chambre du régénérateur. Après un espace de temps déterminé, le processus de chauffe est inversé et l'air de combustion aspiré passe à travers la chambre chaude du régénérateur qui vient d'être chauffée par les gaz résiduels. Les températures de préchauffage sont normalement comprises entre 1 100°C et 1 350°C de sorte que ces fours affichent le meilleur rendement thermique de tous les fours alimentés par des combustibles fossiles.

Il existe deux types de fours à régénérateur, les fours à brûleurs transversaux et les fours à boucle. Les fours à brûleurs transversaux ont des orifices et des brûleurs des gaz de combustion situés les des côtés du four, tandis que les chambres du régénérateur sont placées sur l'un ou l'autre côté du four. Dans les fours à boucle, les deux régénérateur sont situées à l'une des extrémités du four et ont chacun un seul orifice. Ces fours sont principalement utilisés pour des productions effectuées en quantités plus limitées parce qu'ils ont des dimensions et une surface utile plus compactes, et que les pertes de chaleur, leur consommation d'énergie et leurs coûts de construction sont moins élevés. Cependant, ils se

caractérisent par une flamme en boucle entre les chambres adjacentes du régénérateur ; cela pose des problèmes lorsqu'il faut « couvrir » de grandes surfaces de verre (la superficie maximale est de l'ordre de 110 à 120 m² et la tirées d'environ 400–450 tonnes / jour de production). Il est préférable d'utiliser des fours à brûleurs transversaux pour la fabrication de verres de surface importante. Presque tous les fours utilisés pour la fabrication du verre plat ont des orifices latéraux.

Fours à récupérateurs / fours à flamme

Les fours à récupérateurs utilisent des échangeurs de chaleur métalliques pour la récupération de la chaleur et préchauffent continuellement l'air de combustion au moyen des gaz résiduels. Les propriétés des matériaux limitent les températures de préchauffage de l'air à une fourchette allant de 750°C à 800°C, mais des fours novateurs, qui en sont encore au stade des essais, permettent d'atteindre des températures de préchauffe qui peuvent même dépasser 900°C. Parce que les températures de préchauffe de l'air sont plus faibles, la capacité de fusion spécifique (par unité de superficie de fusion) de ces fours est inférieure d'environ 30 % à celle des fours à régénérateurs. Ce type de four est essentiellement utilisé pour les opérations qui nécessitent une grande flexibilité et pour lesquelles l'apport initial en capital est limité. Dans les petites verreries, l'utilisation de régénérateurs n'est pas viable d'un point de vue économique. Les fours à récupérateur sont généralement utilisés dans les installations qui ont une petite capacité de production, mais des fours à haute capacité (atteignant 400 tonnes par jour) existent également. Bien que les fours à flamme (ou à chauffage direct) ne soient pas nécessairement équipés de récupérateurs, la plupart le sont. Les travaux de terrassement nécessaires à l'installation de fours à récupérateurs et à flamme sont généralement peu importants.

Fours oxy-combustible

La fusion oxy-combustible implique le remplacement de l'air de combustion par de l'oxygène. L'élimination d'azote de l'atmosphère de combustion permet de réduire le volume des gaz résiduels et évite d'avoir à utiliser des systèmes de récupération de la chaleur. La consommation d'énergie du four est plus faible parce que le système chauffe l'oxygène au lieu de l'air (qui comprend 80 % d'azote) pour le porter aux températures de combustion. Certains types de fours oxy-combustible utilisent les gaz résiduels pour préchauffer les matières de la composition et le calcin. La production spécifique de NO_x (kg / kg de verre) est sensiblement réduite mais, en raison de la réduction des flux de gaz d'évacuation, les concentrations de NO_x sont nettement supérieures à la normale. La conception des fours oxy-combustible est fondamentalement semblable à celle des fours à flamme à récupérateur et se caractérise par de multiples brûleurs latéraux et un orifice d'évacuation des gaz résiduels. Il importe, avant de les adopter, d'étudier très soigneusement les compromis que leur installation implique au plan des coûts, comme indiqué dans la section suivante.

Fours électriques

Le four électrique est une structure de fusion en réfractaires équipés d'électrodes insérées dans la partie latérale, supérieure ou, plus communément, inférieure du four. Les fours électriques sont généralement petits et sont surtout utilisés pour la verrerie spéciale. Le chauffage électrique élimine la formation de sous-produits de combustion, parce qu'aucun combustible fossile n'est employé, et de compositions résiduelles de sorte que les émissions de ces fours sont nettement plus faibles. En outre, les fours électriques pouvant être presque totalement rendus étanches, il est préférable de les utiliser lorsque les émissions atmosphériques provenant de la composition sont particulièrement polluantes.

Fours discontinus

Ces fours sont utilisés lorsque de plus petites quantités de verre sont nécessaires, en particulier dans les situations où la formulation du verre change régulièrement. Des fours à pot ou des fours à bassin sont utilisés pour fondre les compositions de matières premières. Certains de ces fours, de forme concentrique et cylindrique, utilisent des récupérateurs simples et peuvent atteindre des températures d'air de préchauffage comprises entre 300°C et 400°C. Cependant, la plupart de ces fours ne comportent pas de systèmes de préchauffage de l'air.

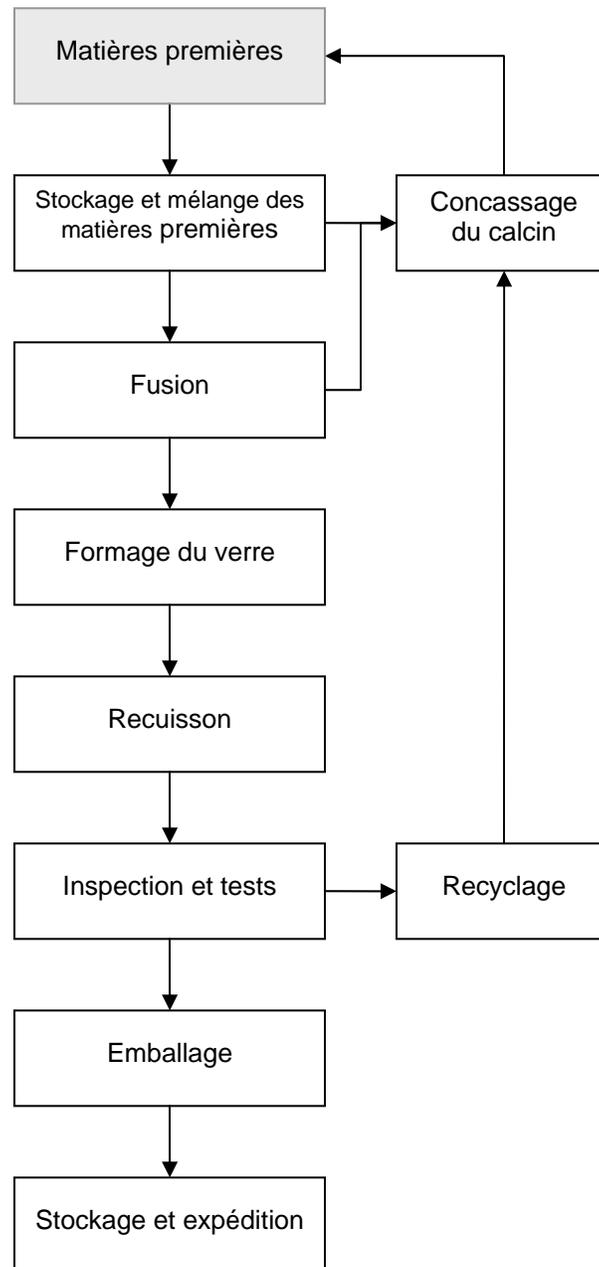
Apport complémentaire d'électricité et d'oxygène

Certains fours fonctionnent uniquement à l'électricité mais, le plus souvent, un « apport complémentaire » d'électricité accroît le chauffage provenant de la combustion du combustible dans les fours à régénérateur ou à récupérateur. L'appoint électrique crée les conditions nécessaires pour chauffer des zones particulières du verre pour lesquelles le chauffage avec une flamme normale (flamme inférieure) se révèle difficile ou un profil de température spécifique est recherché. Il est aussi possible d'avoir recours à l'électricité lorsqu'il est nécessaire d'accroître la production pendant une courte période ou le rendement du four au-delà de ce qui serait faisable sans d'importants travaux de reconstruction. En général, la quantité d'énergie électrique fournie par un apport complémentaire représente entre 4 et 10 % de la consommation totale d'énergie. De manière similaire, l'injection d'oxygène (l'air de combustion est remplacé par de l'oxygène dans un nombre limité de brûleurs) permet d'accroître le rendement du four dans certaines circonstances. En général, entre 10 et 30 % de l'air de combustion sont remplacés par de l'oxygène.

Les fours électriques et oxy-combustible permettent de systématiquement consommer moins de combustibles et, comme ils permettent d'éviter de devoir installer des systèmes de récupération de la chaleur résiduelle par suite de la réduction

substantielle du volume de gaz résiduels, les coûts d'investissement sont souvent également moins élevés. Il importe cependant de rechercher à concilier les aspects économiques, énergétiques et environnementaux de ces technologies pour pouvoir justifier la production d'oxygène et d'électricité sur la base de considérations énergétiques et environnementales. Les coûts relatifs de l'électricité et des combustibles fossiles pour l'exploitation de ces fours sont l'élément déterminant de la viabilité économique de ces techniques et doivent être pris en considération au cas par cas.

Figure A.1 : Processus de fabrication du verre



Note : Le calcin externe, qui n'apparaît pas sur cette figure, peut être aussi utilisé comme matière première. Comme il est lavé avant son utilisation, il ne peut pas être traité avec les autres matières premières. Le calcin externe est généralement stocké au moment de sa livraison – puis lavé et ajouté à la composition ; le calcin propre n'est pas stocké.