

# 84

Rédacteurs

*Joel Bender et Jonathan P. Hellerstein*

## Table des matières

Le verre, les céramiques et les matériaux connexes . . . . .	<i>Jonathan P. Hellerstein, Joel Bender, John G. Hadley et Charles M. Hohman</i>	84.2
<b>Encadrés</b>		
Les fibres optiques. . . . .	<i>Georges R. Osborne</i>	84.11
Les gemmes synthétiques . . . . .	<i>Basil Dolphin</i>	84.28

## ● LE VERRE, LES CÉRAMIQUES ET LES MATÉRIAUX CONNEXES

*Jonathan P. Hellerstein, Joel Bender,  
John G. Hadley et Charles M. Hohman*

Ce chapitre traite des secteurs de l'industrie fabriquant les produits suivants:

- le verre;
- les fibres minérales vitreuses artificielles;
- la céramique;
- les carreaux en céramique;
- la céramique industrielle;
- les briques et les carreaux;
- les réfractaires;
- les gemmes synthétiques;
- les fibres optiques.

Il est intéressant de constater que non seulement ces secteurs existaient déjà pour la plupart dans l'Antiquité, mais aussi qu'ils ont en commun un bon nombre de procédés. Par exemple, tous sont basés sur l'utilisation de matières premières naturelles réduites en poudre ou en fines particules que l'on chauffe pour obtenir les produits finis souhaités. C'est pourquoi, malgré l'éventail de procédés et de produits envisagés ici, nous pouvons dresser un panorama général des dangers potentiels pour la santé associés à ces industries. Etant donné que les différents secteurs de fabrication sont constitués aussi bien de petites usines éloignées les unes des autres (par exemple, pour la fabrication des briques) que de grandes unités de production hautement techniques employant des milliers de travailleurs, chacun d'eux sera décrit séparément.

### Les procédés et les risques communs

La fabrication des produits dans cette industrie expose à des risques professionnels qui sont communs à tous les secteurs précités. Ces risques et les mesures de prévention associées sont traités ailleurs dans la présente *Encyclopédie*. Les risques propres aux différents procédés sont exposés dans les parties correspondantes de ce chapitre.

### Les procédés de manutention et de dosage des matières premières

Dans la plupart des cas, les matières premières sont livrées sèches, sous forme solide, en vrac ou dans des sacs individuels. Les matières premières solides en vrac sont déchargées de wagons ou de camions dans des silos, cuves ou trémies, lignes pneumatiques, transporteurs à vis, à godets et autres moyens mécaniques. Les palettes de sacs de matières premières (20 à 50 kg) ou les grands sacs en tissu contenant le matériau en vrac (0,5 à 1 tonne) sont déchargés des remorques des camions ou des wagons par des chariots élévateurs, des grues ou des treuils. Les sacs sont enlevés des palettes manuellement ou à l'aide d'appareils de levage. Les matières premières en sacs sont généralement déchargées sur une aire de stockage ou directement dans des trémies d'attente ou de pesage.

Le déchargement, la manutention et le transfert des matières premières solides exposent aux risques ci-après:

- le *bruit* à des niveaux compris entre 85 et 100 dBA. Les vibreurs pneumatiques, les compresseurs, les soupapes d'échappement, les moteurs d'entraînement des mélangeurs, les souffleries et les dispositifs d'aspiration des poussières sont des sources importantes de bruit;
- les *particules en suspension dans l'air* provenant du transvasement et du mélangeage des matières premières solides sous forme gra-

nulaire. Les risques d'exposition dépendent de la composition des matières premières, celles-ci comprenant souvent de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), de l'argile, de l'alumine, de la chaux, des poussières alcalines, des oxydes de métaux, des métaux lourds et d'autres particules nocives;

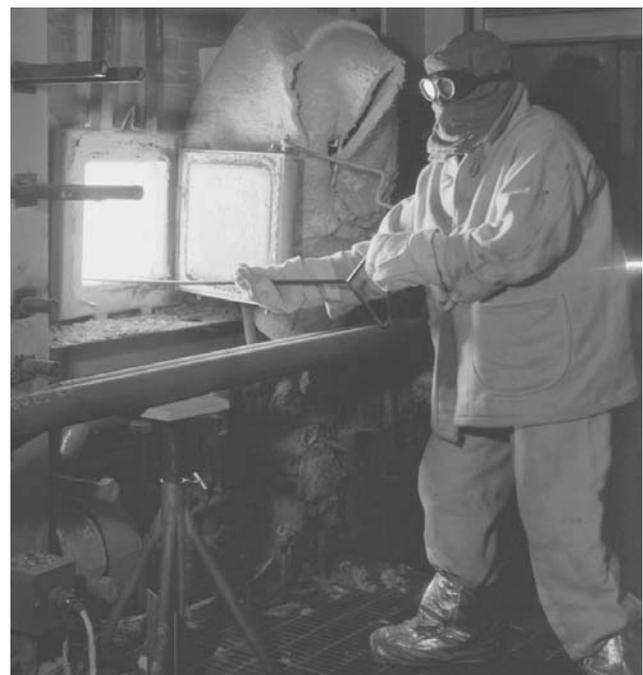
- les *risques ergonomiques* associés au levage manuel, à la manutention des sacs de matières premières, aux vibreurs ou aux chaînes de fabrication et aux activités de maintenance des systèmes;
- les *risques physiques* liés aux manœuvres des wagons ou des camions, aux déplacements des chariots élévateurs, au travail en hauteur, à l'accès dans des espaces confinés et au contact avec des sources d'énergie électrique, pneumatique ou mécanique — par exemple, points d'étranglement, pièces en rotation, engrenages de transmission, arbres, courroies et poulies.

### Les procédés de cuisson et de fusion

La fabrication de ces produits fait intervenir des procédés de séchage, fusion ou cuisson dans des fours. La chaleur nécessaire est générée par la combustion de propane, de gaz naturel (méthane) ou de mazout, la fusion à l'arc électrique, des micro-ondes, le séchage diélectrique ou le chauffage par une résistance électrique. Les risques potentiels liés à ces procédés comprennent:

- les *expositions à des produits de combustion* tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et le dioxyde de soufre;
- les *fumées* et les *poussières* provenant des matières premières en suspension (par exemple, silice, métaux, poussières alcalines) ou de sous-produits (fluorure d'hydrogène, cristobalite, fumées de métaux lourds, etc.);
- les *incendies* ou les *explosions* liés aux systèmes d'alimentation en combustible des usines et aux moteurs des chariots élévateurs; les risques d'incendie ou d'explosion associés aux citernes de stockage de combustibles ou de carburants inflammables, aux

Figure 84.1 • Technicien du contrôle de la qualité prélevant des échantillons de verre dans un four



La personne porte un équipement de protection individuelle contre la chaleur et des lunettes filtrant l'infrarouge.

Libbey-Owens-Ford

réseaux de tuyaux de distribution et aux injecteurs. Lorsqu'ils sont rarement utilisés, les systèmes de secours pour les cas de pénuries de gaz naturel peuvent présenter des risques similaires d'incendie et d'explosion;

- les *expositions au rayonnement infrarouge* provenant de matériaux en fusion. Elles peuvent augmenter le risque de cataracte induite par la chaleur ou de brûlures cutanées;
- l'*énergie rayonnante* et la *contrainte thermique*. Il peut régner autour des fours une chaleur extrêmement intense. Des problèmes peuvent survenir lorsque des travaux de réparation d'urgence ou de simple entretien sont effectués à proximité des fours de cuisson ou de fusion. Le contact direct de la peau avec des surfaces chaudes ou des matériaux en fusion peut provoquer de graves brûlures (voir figure 84.1);
- les *risques liés à l'énergie électrique*. L'électricité à haute tension qui alimente les résistances de chauffage en complément du chauffage au mazout présente un risque d'électrocution par contact direct et est susceptible de causer d'autres problèmes de santé en raison de la présence de champs électromagnétiques. Les champs électriques et magnétiques intenses peuvent interférer avec les stimulateurs cardiaques ou d'autres dispositifs médicaux implantés;
- les *expositions à des niveaux sonores* dépassant 85 ou 90 dBA en provenance des souffleries de combustion, des trémies à combustible ou des mélangeurs contenant les matières premières, des dispositifs d'alimentation et des convoyeurs.

#### **La manutention des matériaux lors de la production, de la fabrication, de l'emballage et de l'entreposage**

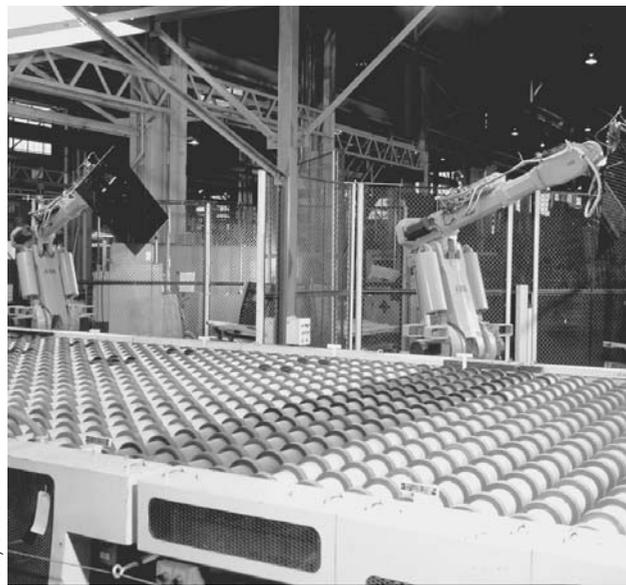
Selon la taille, la forme et le poids des produits, chaque secteur utilise des procédés de manutention, de fabrication et d'emballage qui lui sont propres. La densité élevée des matériaux mis en œuvre ou le fait qu'ils soient en vrac expose à des risques communs dans les différents secteurs considérés ici. Le levage manuel et la manutention lors de la production, de la fabrication, de l'emballage ou de l'entreposage sont à l'origine de nombreux accidents invalidants (voir ci-après la rubrique «Les types d'accidents du travail et de maladies professionnelles», p. 27). Des efforts ont donc été faits pour limiter le plus possible ces opéra-

Figure 84.2 • Manutention par ventouse de paquets de 20 à 35 kg de fibres de verre textile



Owens Corning

Figure 84.3 • L'automatisation de la manutention des plaques de verre réduit les risques de nature ergonomique et de coupures



Libbey-OwensFord

tions. Par exemple, dans le but d'éliminer les accidents en découlant, certains secteurs de l'industrie ont commencé à employer des emballages nouveaux, des automates pour empiler ou palettiser les produits finis et des véhicules télépilotés pour le transport vers les entrepôts. Des bandes transporteuses, des appareils au levage (par exemple, palans pneumatiques) et des tables élévatrices à parallélogramme articulé sont couramment utilisés pour assurer la manutention et la palettisation des produits (voir figure 84.2).

L'utilisation des automates pour éliminer la manutention manuelle joue un rôle prépondérant dans la prévention des lésions dues à des carences ergonomiques. L'automatisation des procédés a permis d'atténuer deux types de risques auxquels était traditionnellement exposé le personnel de production lors de la manutention des matériaux (par exemple, celle du verre plat): risques liés à des problèmes de nature ergonomique et risques de graves coupures (voir figure 84.3). Cependant, le développement du recours aux automates et de l'automatisation des procédés entraîne de nouveaux risques dus aux machines en mouvement et à l'alimentation électrique, qui frappent désormais également des catégories de travailleurs (maintenance) jusqu'ici moins touchées. La conception adéquate des commandes électroniques et des séquences logiques, la protection des machines, l'isolation complète des sources d'énergie et l'instauration de procédures d'utilisation et de maintenance sûres sont des moyens fondamentaux pour prévenir les risques d'accident auxquels sont exposés et les travailleurs de la production et ceux de la maintenance.

#### **Les activités de remise en état et de réparation**

Les remises en état périodiques et les réfections à froid des fours présentent de multiples dangers pour la sécurité et la santé. Les activités de construction comportent de nombreux risques: risques ergonomiques liés à la manutention des matériaux (briques réfractaires); exposition à des particules de silice, d'amiante, de fibres de céramiques réfractaires ou de métaux lourds en suspension dans l'air lors de travaux de démolition ou lors d'opérations de découpe ou de soudage; excès de chaleur; travail en hauteur; risques

Figure 84.4 • Travail en espace confiné lors de la réfection d'un four dans une usine de fibres de verre



La pulvérisation d'eau réduit le nombre de particules en suspension dans l'air pendant les opérations de démolition du four.

de glissade, de trébuchement ou de chute; risques liés au travail en espace confiné (voir figure 84.4); contact avec des sources d'énergie dangereuses.

## Le verre

### Généralités

Le verre s'est formé naturellement à partir d'éléments présents dans la croûte terrestre bien avant qu'on ne songe à en analyser la composition, à le façonner ou qu'on le destine aux innombrables

Figure 84.5 • Canne de souffleur de verre



usages que nous lui connaissons aujourd'hui. L'obsidienne, par exemple, est une forme naturelle d'oxydes fondus sous l'effet de la chaleur intense des volcans et vitrifiés (transformés en verre) par un refroidissement rapide à l'air. C'est à sa teneur relative élevée en oxyde de fer qu'elle doit sa couleur noire opaque. Sa résistance aux agents chimiques et sa dureté sont tout à fait comparables à celles de bon nombre de verres commerciaux.

La technologie du verre a une histoire vieille de 6 000 ans et certaines applications modernes remontent à la plus haute Antiquité. L'origine des premiers verres synthétiques se perd dans la nuit des temps et dans la légende. Les Égyptiens savaient fabriquer la faïence: ils façonnaient des figurines à partir de sable ( $\text{SiO}_2$ ), l'oxyde le plus courant pour la formation du verre. On le recouvrait de natron, résidu abandonné par le Nil lors de ses crues, et composé principalement de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) et d'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ). En chauffant à une température inférieure à 1 000 °C, on obtenait un enduit vitreux grâce à la diffusion des fondants  $\text{CaO}$  (oxyde de calcium) et  $\text{Na}_2\text{O}$  (oxyde de sodium) dans le sable puis à leur solidification au contact du sable. L'oxyde de cuivre donnait à l'objet une belle couleur bleue.

Selon la définition de Morey, «le verre est une substance inorganique qui dérive d'une façon continue de l'état liquide et lui est analogue, mais qui, conséquence d'un changement inverse de viscosité pendant le refroidissement, atteint un tel degré de viscosité qu'on peut la considérer comme rigide pour toutes les applications pratiques». La Société américaine pour l'essai des matériaux (American Society for Testing and Materials (ASTM)) définit le verre comme «un produit inorganique de fusion qui, en refroidissant, a atteint l'état rigide sans cristalliser». Organiques ou inorganiques, des substances peuvent se transformer en verre si leur structure n'est pas cristalline — c'est-à-dire sans caractère ordonné à longue distance.

Progrès majeur dans la technologie du verre, la canne à souffler (voir figure 84.5) fut introduite aux alentours de 100 avant J.-C., imprimant un développement rapide à la technique de fabrication du verre.

D'abord coloré à cause de la présence d'impuretés comme les oxydes de fer et de chrome, il faut remonter à environ 1 500 ans pour voir le premier verre quasiment incolore.

C'est à cette époque que l'industrie du verre commence à se développer à Rome. Elle se répand ensuite à travers l'Europe. Venise devient un important centre de verrerie. Au XIII<sup>e</sup> siècle, nombre de ses fabriques s'installent sur l'île toute proche de Murano. De nos jours encore, Murano est un centre de production artisanale de verrerie d'art en Italie.

Au XVI<sup>e</sup> siècle, on fabrique du verre dans toute l'Europe. La République tchèque est toujours renommée pour son verre de Bohême; le Royaume-Uni ainsi que l'Irlande produisent des articles de table en cristal au plomb de haute qualité. La Suède fabrique également des objets d'art en cristal.

En Amérique du Nord, la toute première usine fut une verrerie. Les colons anglais, en effet, commencèrent la production du verre au début du XVII<sup>e</sup> siècle à Jamestown en Virginie.

Aujourd'hui, presque tous les pays du monde fabriquent du verre. De nombreux articles proviennent de chaînes de production entièrement automatisées. Bien que le verre soit un matériau très ancien, ses propriétés, uniques, ne sont pas encore entièrement comprises.

L'industrie contemporaine du verre comprend plusieurs grands segments de marché: le marché du verre plat, le marché des articles de ménage, le marché des récipients de verre, le marché du verre optique et la verrerie de laboratoire. Les marchés du verre optique et la verrerie de laboratoire sont généralement très organisés et dominés par un ou deux fournisseurs dans la plupart

des pays. Ils représentent aussi un volume beaucoup plus faible que le marché grand public. Chacun de ces marchés a progressé au fil des années grâce à des innovations techniques ou aux progrès des modes de fabrication. L'industrie des récipients, par exemple, a bénéficié, au début du XX<sup>e</sup> siècle, de la construction de machines ultrarapides pour la fabrication des bouteilles. Au début des années soixante, l'industrie du verre plat a connu un essor important grâce au développement du procédé du verre flotté. Aujourd'hui, l'une et l'autre pèsent plusieurs milliards de dollars E.-U. à l'échelle mondiale.

Les articles de ménage en verre comprennent quatre grandes catégories:

1. les articles de table en verre (assiettes, tasses, etc.);
2. les verres (à boire);
3. les ustensiles de cuisine allant au four;
4. les ustensiles de cuisine allant au feu.

Bien qu'il soit difficile d'obtenir des estimations mondiales, le marché de la verrerie de ménage représente, aux États-Unis seulement, environ 1 milliard de dollars. Selon la catégorie, le verre est en concurrence avec d'autres matériaux — la céramique, le métal et les matières plastiques.

### Les procédés de fabrication

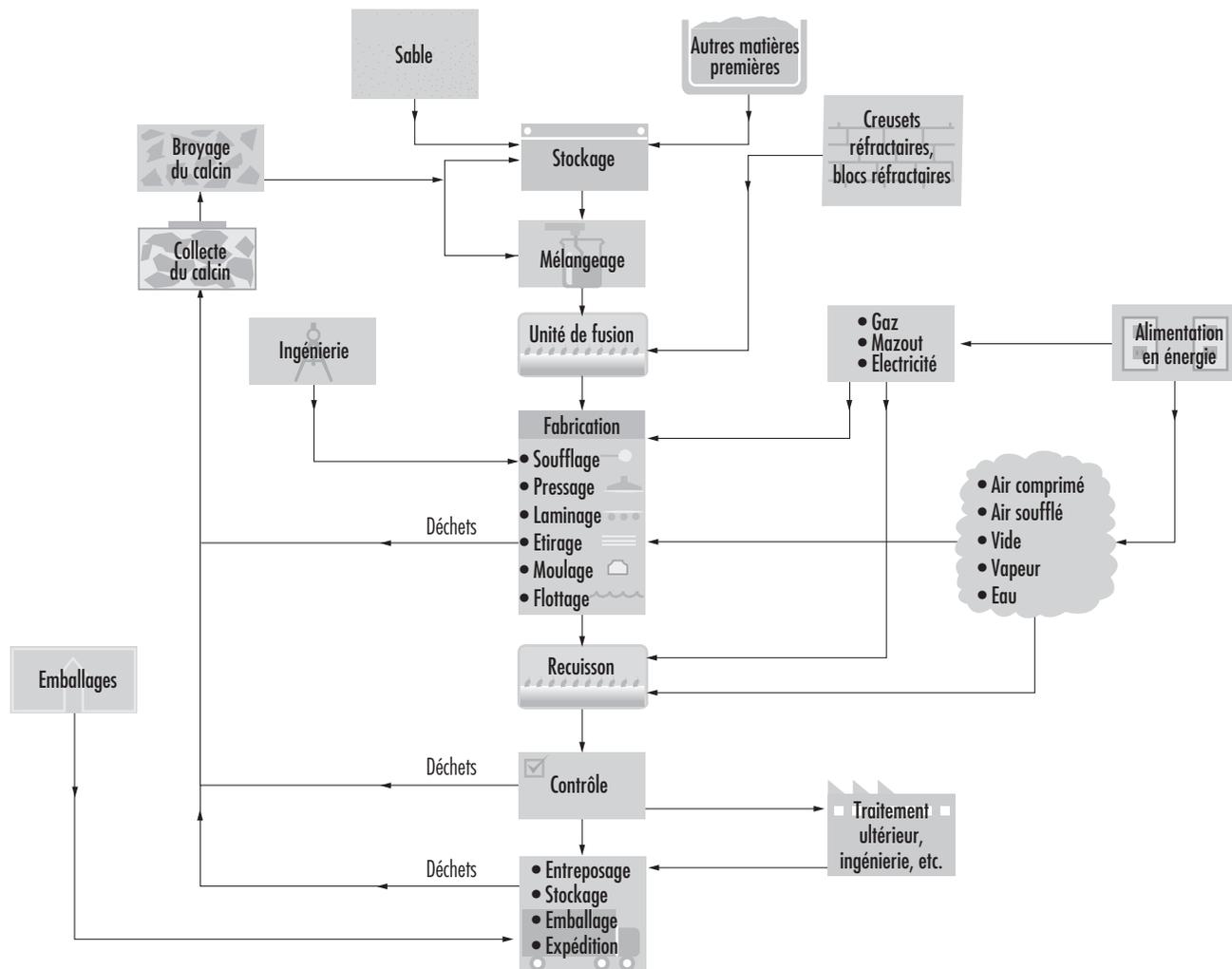
Le verre est un produit inorganique résultant d'une fusion, suivie d'un refroidissement, jusqu'à l'état rigide sans cristallisation. Dur et cassant, il se caractérise par une fracture conchoïdale. En faisant varier les matériaux amorphes ou cristallins qu'il contient, on obtient du verre coloré, translucide ou opaque.

Refroidi à partir de son état de fusion, le verre augmente peu à peu en viscosité sans cristallisation dans une plage de températures étendue jusqu'à acquérir sa forme caractéristique dure et cassante. Son refroidissement doit s'effectuer dans des conditions bien déterminées pour éviter la cristallisation ou l'apparition de trop fortes tensions internes.

Si, en théorie, tout composé possédant ces propriétés physiques est du verre, la plupart des verres du commerce, qui peuvent avoir des compositions chimiques très différentes, entrent dans l'une des trois catégories ci-après:

1. *Les verres sodocalciques* (contenant principalement de la silice, de la soude et de la chaux) se classent au premier rang par l'importance de leur production et la diversité de leurs utilisations; presque tout le verre plat, les récipients en verre, la verrerie domestique à bon marché produite en grande série et les ampoules électriques sont en verre de ce type.

Figure 84.6 • Procédés et matériaux intervenant dans la fabrication du verre



2. *Les verres de silice (et potasse) au plomb* contiennent une proportion variable, mais souvent importante, d'oxyde de plomb. Leur indice de réfraction élevé est mis à profit dans l'industrie du verre optique. La facilité avec laquelle ils se laissent couper et polir en fait un matériau tout indiqué pour la verrerie domestique ou décorative soufflée. Leur haute résistivité électrique et la protection qu'ils offrent contre les rayonnements les désignent pour des applications électriques et électroniques.
3. *Les verres borosilicatés* ont un faible coefficient de dilatation thermique et sont résistants aux chocs thermiques, ce qui en fait d'excellents matériaux pour la verrerie de laboratoire, les ustensiles de cuisine allant au four et la fibre de verre renforçant les matières plastiques.

Plusieurs composants entrent dans la fabrication du verre commercial. Quatre à six d'entre eux pourtant dominent, obtenus à partir de matériaux comme le sable, la chaux, la dolomite, le carbonate de sodium, le borax, l'acide borique, les feldspaths, des composés du plomb et du baryum. Ajoutés en petites quantités, les autres sont choisis parmi 15 à 20 matériaux, couramment qualifiés d'additifs. Ils servent à conférer au verre, lors de la préparation, une fonction ou une qualité particulière, par exemple sa couleur.

La figure 84.6 montre les différentes étapes de la fabrication du verre. Les matières premières sont pesées, mélangées et, après adjonction de débris de verre, ou calcin, amenées au four pour la fusion. Pour la fusion du cristal destiné à être soufflé selon les procédés artisanaux, ainsi que pour certains verres produits en faibles quantités, on utilise encore des creusets dont la contenance est inférieure à 2 tonnes. Plusieurs de ces creusets peuvent être chauffés ensemble dans une chambre de combustion.

Dans la plupart des verreries modernes, la fusion se fait dans de grands fours de régénération, de récupération ou des fours électriques en matériaux réfractaires et chauffés selon le cas au mazout, au gaz naturel ou à l'électricité. L'appoint de chauffage électrique et la fusion électrique (avec émaillage à froid) ont été universellement utilisés à la fin des années soixante et dans les années soixante-dix. C'est la lutte contre la pollution qui a fait choisir la fusion électrique, tandis que l'appoint de chauffage électrique

visait généralement à améliorer la qualité du verre et à augmenter la production.

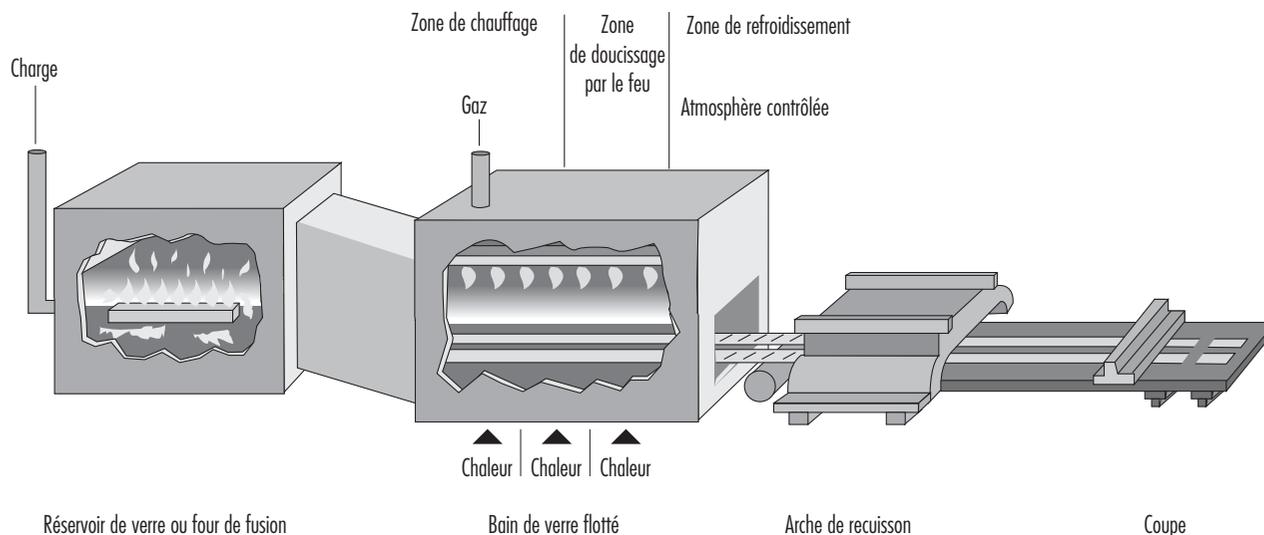
Les facteurs économiques qui jouent un rôle important dans le choix de l'électricité pour les fours de fusion du verre sont liés entre autres au prix des combustibles fossiles, à la disponibilité des différents combustibles, au coût de l'électricité et aux investissements en matériel nécessaires. Cependant, c'est la protection de l'environnement qui motive souvent au premier chef le choix de la fusion électrique ou de l'appoint de chauffage électrique. Des règlements relatifs à l'environnement réduisant rigoureusement le rejet d'oxydes ou de particules sont entrés en vigueur dans plusieurs pays. Par voie de conséquence, de nombreux verriers se trouvent confrontés à l'alternative suivante: soit réduire les émissions lors de la fusion, installer des filtres à manches ou des séparateurs afin de limiter les émissions des rejets gazeux, soit modifier le procédé de fusion et inclure la fusion électrique ou l'appoint de chauffage électrique. Dans certains cas, l'usine n'a d'autre choix que de fermer.

La partie la plus chaude du four (superstructure) peut atteindre de 1 600 à 2 800 °C. Un refroidissement contrôlé permet d'abaisser la température du verre jusqu'à 1 200 ou 1 000 °C à sa sortie du four. En outre, tous les types de verre subissent un refroidissement ultérieur (recuison) dans un four spécial à température contrôlée ou dans une arche de recuison. Les opérations de transformation ultérieures dépendent du type de procédé de fabrication.

Le soufflage automatique est utilisé pour la fabrication des bouteilles et des ampoules électriques en plus du soufflage artisanal traditionnel. Les articles de forme simple — isolateurs, briques de verre, verres optiques, etc. — sont pressés plutôt que soufflés. Dans certains procédés de fabrication, on associe le soufflage et le pressage. Le verre armé et le verre à dessins sont laminés. Le verre à vitres est étiré du four verticalement, ce qui lui donne une surface adoucie au feu. Sous les effets combinés de l'étréage et de la gravité, il subit certaines déformations.

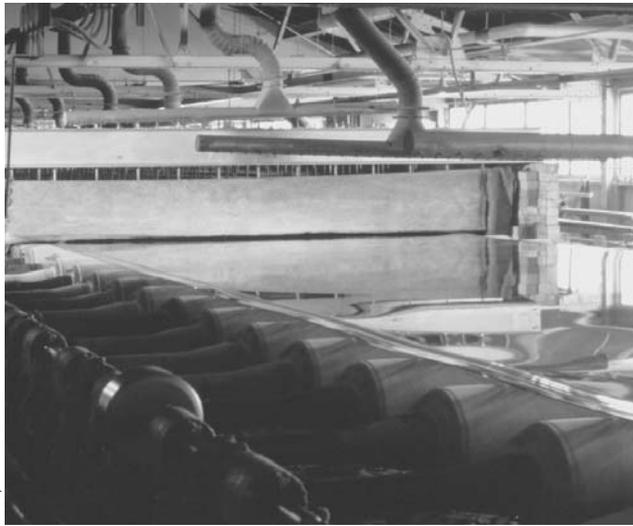
Le verre plat passe entre des rouleaux refroidis à l'eau puis dans une arche de recuison. Il ne présente pas de déformation. On rectifie après fabrication les irrégularités de sa surface par dégrossissage et polissage. Depuis quelques années, ce procédé est largement supplanté par le procédé de verre flotté (voir figure 84.7). Ce

Figure 84.7 • Procédé continu de production de verre par flottage



Source: d'après Tooley, 1974.

Figure 84.8 • Ruban de verre flotté sortant de l'arche de recuisson



LibbeyOwensFord

dernier a permis la fabrication de verre qui allie les avantages du verre en feuilles et du verre plat. La surface du verre flotté présente l'aspect des surfaces polies au feu et elle est exempte de déformations.

Dans ce procédé, le verre en fusion coule, à sa sortie du four, en un ruban continu sur un bain d'étain fondu, dont il épouse la surface parfaitement plane. Lors de son passage sur l'étain, le verre se refroidit jusqu'à ce qu'il soit suffisamment dur pour passer entre les rouleaux de l'arche de recuisson sans que sa face intérieure soit marquée. Une atmosphère inerte empêche l'oxydation de l'étain. Après la recuisson, le verre ne nécessite plus aucun traitement et peut être automatiquement coupé et emballé (voir figure 84.8).

La tendance de l'architecture actuelle à accroître les surfaces vitrées pour les locaux à usage d'habitation comme à usage commercial, et la nécessité de réduire la consommation d'énergie ont incité à améliorer les qualités isolantes des fenêtres. De minces films déposés à sa surface confèrent au verre des propriétés de faible émissivité ou de sélectivité du rayonnement solaire. La commercialisation de ces produits exige le recours à une technologie peu coûteuse de dépôt sur de grandes surfaces. C'est pourquoi de plus en plus de chaînes de fabrication de verre flotté sont équipées de procédés d'enduction très élaborés.

Dans les procédés de dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapour Deposition (CVD)), fréquemment utilisés, on met en contact avec un substrat chaud un mélange de gaz complexe qui, par pyrolyse, forme un dépôt à la surface du verre. En général, cela s'effectue grâce à des dispositifs à température contrôlée suspendus au-dessus de la largeur du ruban de verre soit dans le bain d'étain, soit dans l'ouverture de l'arche, soit encore dans l'arche elle-même. Leur fonction est de répartir uniformément les gaz précurseurs sur toute la largeur du ruban en contrôlant la température et d'extraire en toute sécurité les sous-produits gazeux de la zone de dépôt. Si plusieurs couches de film sont nécessaires, on place un certain nombre de structures en série au-dessus du ruban de verre.

Pour le traitement des sous-produits gazeux dégagés par l'application de ces méthodes à grande échelle, il suffit en général de recourir au procédé d'épuration humide en utilisant un filtre-

presse conventionnel. Lorsqu'il s'avère difficile de faire réagir le gaz émis ou de les mouiller au moyen de solutions aqueuses, il faut recourir à l'incinération.

Certains verres optiques sont renforcés chimiquement par des procédés dans lesquels le verre est immergé plusieurs heures durant dans des bains à haute température contenant des sels fondus tels que le nitrate de lithium et le nitrate de potassium.

Le verre de sécurité comprend deux grandes catégories:

1. Le verre trempé obtenu en précontrainant, par chauffage puis par refroidissement rapide, dans des fours spéciaux, des pièces de verre plat de la forme et de la taille souhaitées.
2. Le verre feuilleté constitué par deux minces feuilles de verre plat collées sur une feuille de matière plastique (généralement du butyral polyvinylique).

## Les fibres minérales vitreuses artificielles

### Généralités

Les fibres minérales vitreuses artificielles sont des silicates amorphes produits à partir d'une grande variété de matériaux: verre, roche, laitier ou d'autres minéraux. Elles peuvent être continues ou discontinues. En général, les fibres continues sont des fibres de verre obtenues par extrusion au travers d'une filière et utilisées pour renforcer d'autres matériaux comme les matières plastiques afin d'obtenir des composites aux propriétés particulières. Les fibres discontinues (généralement appelées «laines») sont employées, entre autres, pour l'isolation thermique et acoustique. Dans le cadre de ce chapitre, les fibres minérales vitreuses artificielles ont été réparties en fibres de verre continues, comprenant les laines de verre servant à l'isolation faites de fibres de verre, de roche ou de laitier, et en fibres céramiques réfractaires, qui sont généralement des silicates d'aluminium.

L'étirage du verre en fusion en longues fibres était déjà connu dans l'Antiquité avant même la technique du verre soufflé. Les Égyptiens fabriquaient leurs vases en enroulant des fibres de verre autour d'une forme en argile, puis ils chauffaient le tout jusqu'à ce que les fibres fondent et s'amalgament; après refroidissement, ils cassaient le moule d'argile. Même après l'apparition de la technique du verre soufflé, au I<sup>er</sup> siècle après J.-C., la technique de la fibre de verre était encore utilisée. Les verriers vénitiens l'ont employée aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles pour la verrerie décorative. Ils enroulaient des paquets de fibres blanches opaques autour d'un récipient en verre transparent soufflé (par exemple, une coupe), puis les faisaient fondre en chauffant.

Même si les fibres de verre ont très longtemps servi à la fabrication d'objets décoratifs et artistiques, ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle qu'elles ont connu leur essor. La production commerciale a démarré d'abord en Europe, puis aux États-Unis dans les années trente. Les laines de roche et de laitier existaient déjà depuis plusieurs années.

Les fibres de verre artificielles sont devenues un composant important de la vie moderne. Leur fabrication et leur utilisation représentent un marché mondial de plusieurs milliards de dollars E.-U. Leur emploi comme isolant a permis une réduction importante des besoins énergétiques pour le chauffage ou le refroidissement des édifices, ce qui, à son tour, a contribué à réduire la pollution globale associée à la production d'énergie. On estime à plus de 30 000 le nombre d'applications des filaments de verre continu pour le renforcement d'innombrables articles, que ce soit dans le secteur du sport, de l'informatique ou de l'aérospatiale. Développées et commercialisées à grande échelle dans les années soixante-dix, les fibres céramiques réfractaires continuent à jouer un rôle clé dans la protection des travailleurs et de l'équipement, en tant que matériau isolant, dans de nombreux procédés de fabrication à haute température.

### Les procédés de fabrication

#### Les filaments de verre continus

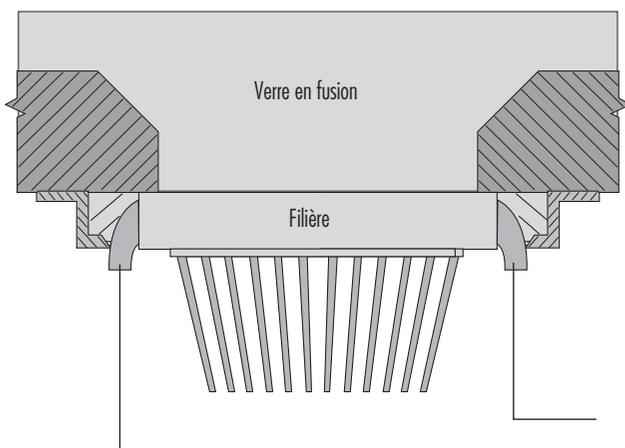
Les filaments de verre, de diamètre presque uniforme, sont formés en continu en forçant le verre fondu par extrusion à travers une filière en métal précieux. Utilisées comme matériau de renforcement, les fibres doivent satisfaire à des exigences physiques spécifiques et leur diamètre est donc relativement plus grand que celui des fibres destinées à être mélangées à la laine d'isolation. Presque tous les filaments de verre continus ont un diamètre compris entre 5 et 15  $\mu\text{m}$  ou davantage. Ces grands diamètres ainsi que leur relative constance lors de la fabrication éliminent les risques de problèmes respiratoires chroniques puisque les fibres sont trop grosses pour être inhalées dans les voies respiratoires inférieures.

Les fibres de verre à filament continu sont obtenues par réduction rapide des gouttes de verre en fusion sortant des orifices des filières sous l'effet de la pesanteur et y restant en suspension. L'équilibre dynamique entre les forces de tension de surface et le rétrécissement mécanique fait que la goutte de verre prend la forme d'un ménisque à l'orifice annulaire de la filière et s'effile jusqu'à avoir le diamètre de la fibre étirée. Pour que l'étirage soit réussi, il faut que le verre atteigne un degré de viscosité compris entre 500 et 1000 poises. A des viscosités plus basses, le verre, trop liquide, se dissipe en gouttelettes; dans ce cas, la tension de surface est trop importante. A des viscosités plus hautes, la tension présente dans la fibre lors de l'affaiblissement est trop élevée. La vitesse d'écoulement du verre à travers l'orifice de la filière peut également devenir trop lente pour permettre le maintien du ménisque.

La filière constitue une plaque percée de centaines d'orifices maintenue à température constante qui a pour fonction de conditionner le verre à cette même température afin que les fibres étirées soient de diamètre identique. La figure 84.9 représente le schéma des principaux éléments d'une filière. La plaque percée d'orifices est placée à la sortie d'un four où elle reçoit le verre en fusion à une température proche de celle à laquelle il passera dans les orifices. Dans ce cas, la fonction de la filière est unique.

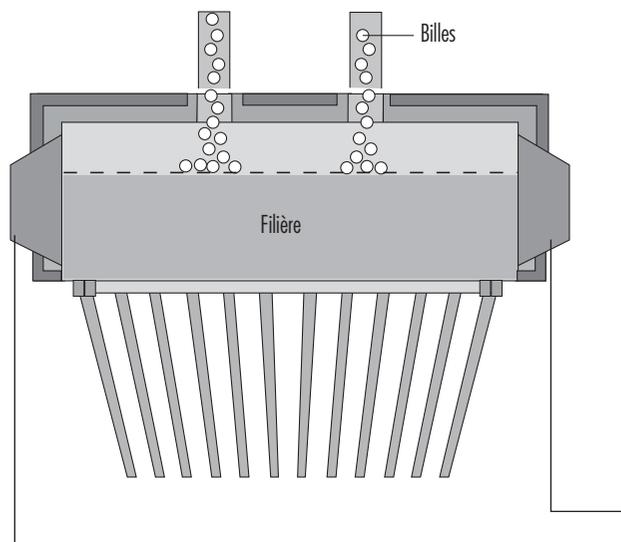
En revanche, si la filière est alimentée par des billes de verre, une seconde fonction s'impose, qui est de faire fondre celles-ci avant de porter le verre à la température correcte pour l'étirage des fibres. On peut voir à la figure 84.10 un exemple de filière alimentée par

Figure 84.9 • Schéma de principe d'une filière recevant directement le verre en fusion



Source: d'après Toolley, 1974.

Figure 84.10 • Schéma de principe d'une filière alimentée par des billes de verre



Source: d'après Toolley, 1974.

Figure 84.11 • Filaments de verre textile sortant de la filière. Rassemblés en mèches, ils sont ensuite bobinés pour être traités



Owens Corning

des billes de verre. Les traits hachurés à l'intérieur de la machine représentent la plaque retenant les billes non fondues.

La conception des filières est en grande partie le fruit de l'expérience. Comme elles doivent résister au verre en fusion et assurer la stabilité de la température nécessaire pour l'extrusion des fibres, elles sont faites d'alliages de platine (alliages à 10 ou à 20% de rhodium-platine), ce dernier étant plus résistant aux déformations à températures élevées. Avant d'être réunies en une ou plusieurs mèches, à leur sortie de la filière, les fibres sont recouvertes d'un apprêt. Les apprêts d'ensimage sont principalement de deux types:

1. Les apprêts d'ensimage à base de corps gras pour les fibres destinées à être tissées en étoffes délicates ou opération similaire.
2. Les agents d'adhésion et de revêtement pour les fibres destinées au renforcement direct des plastiques et du caoutchouc.

Une fois formée, la fibre est recouverte d'un enduit protecteur organique par enduction, et les filaments continus sont rassemblés en mèches (voir figure 84.11) avant d'être enroulés sur une bobine.

Les enducteurs permettent le soufflage des fibres; lorsqu'elles ont de 25 à 45 mm de largeur, elles sont recueillies sur un collecteur et passent sur une surface en mouvement recouverte d'un film d'apprêt.

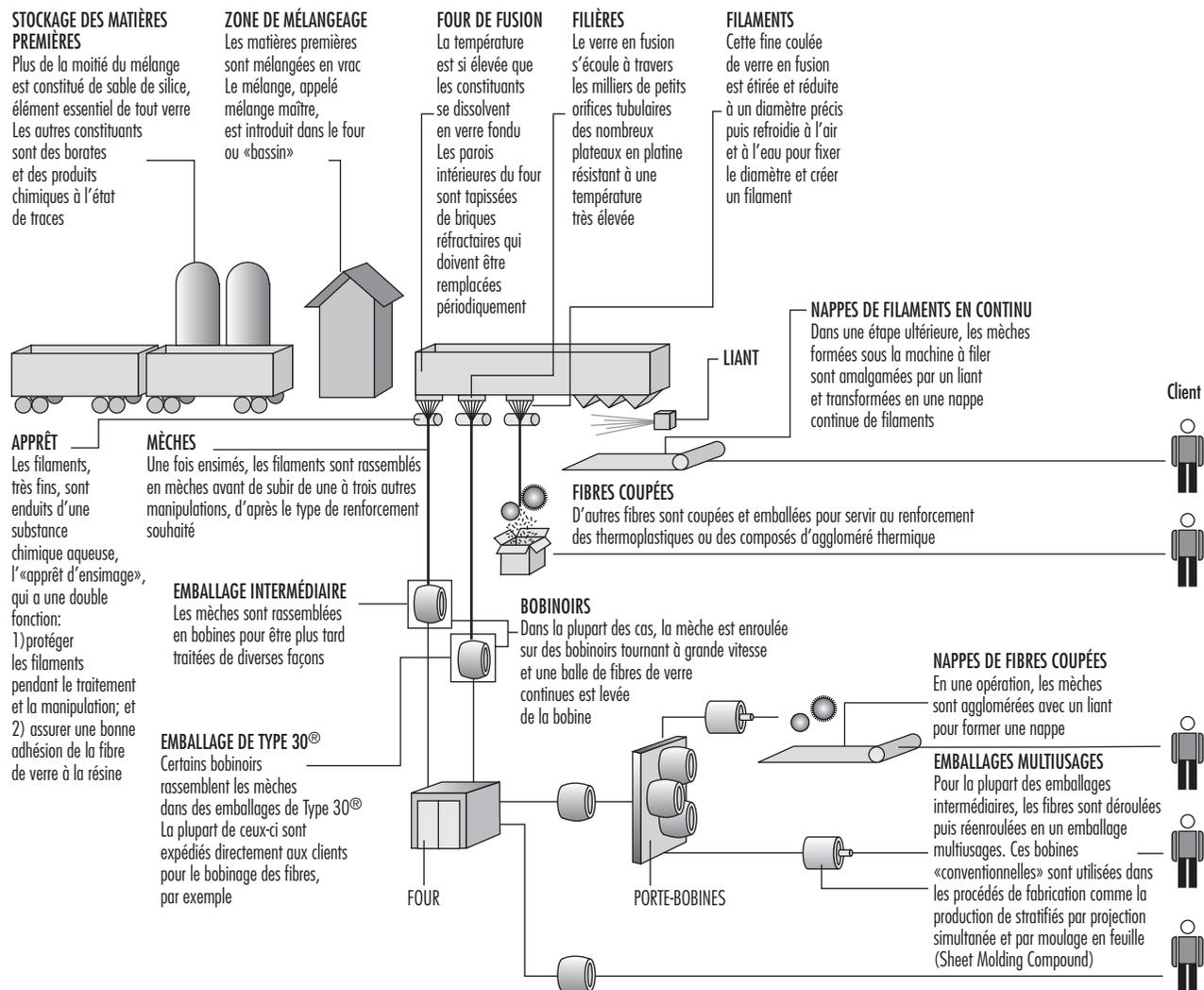
On distingue deux types d'enducteurs:

1. Les rouleaux en caoutchouc, en céramique ou en graphite; la fibre se déplace sur des rouleaux enduits d'apprêt.
2. Les tapis roulants; à l'une des extrémités, le tapis passe sur un rouleau qui le plonge dans l'apprêt et, à l'autre, sur une barre fixe en acier chromé où les fibres s'enduisent d'apprêt au contact du tapis.

Les opérations de revêtement de protection et de rassemblement des fibres peuvent varier en fonction du type de fibres produites: fibres textiles ou de renforcement. L'objectif de base est de recouvrir les fibres d'apprêt, de les rassembler en mèches et de les placer sur le cylindre d'une bobine escamotable avec le minimum de tension.

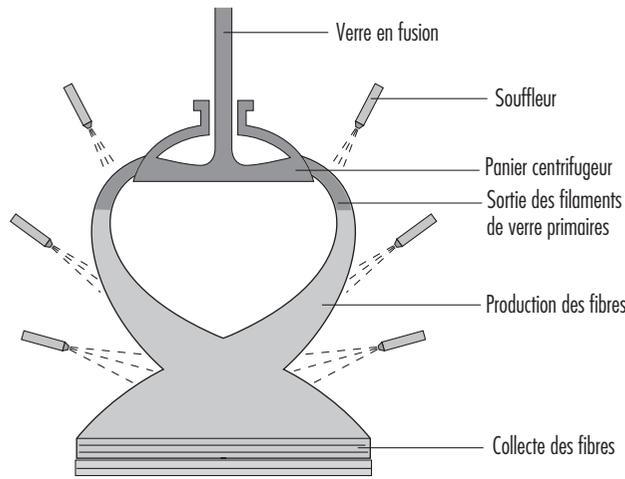
La figure 84.12 illustre le procédé de fabrication des fibres de verre sous forme de filaments continus.

Figure 84.12 • Fabrication des fibres de verre sous forme de filaments continus



Source: Owens Corning.

Figure 84.13 • Fabrication de fibres de laine de verre par centrifugation



**La fabrication de la laine isolante**

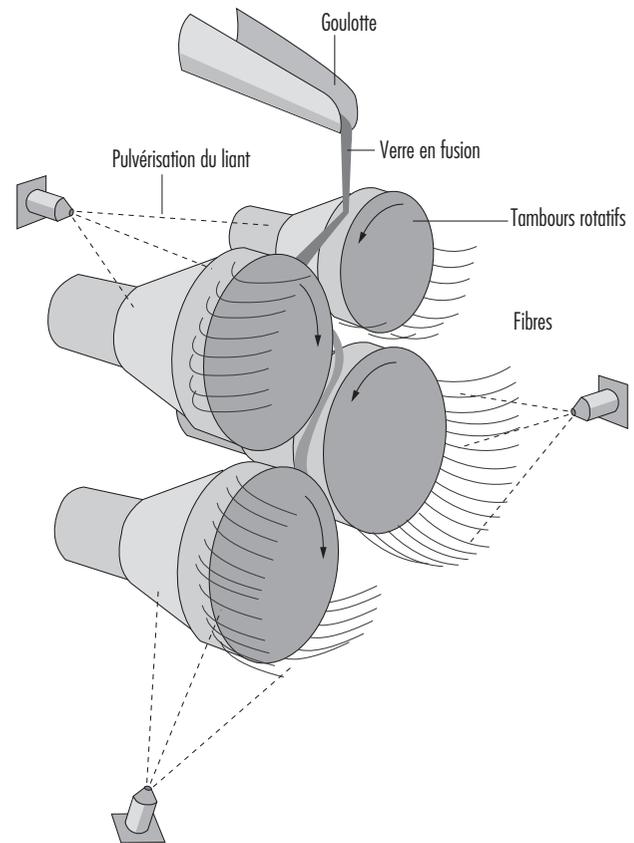
Contrairement aux fibres de verre sous forme de filaments continus, les fibres de laine de verre isolantes et de céramiques réfractaires sont obtenues par des procédés à très haute énergie au cours desquels le matériau en fusion tombe sur des bobinoirs ou sur une série de disques en rotation. On obtient ainsi des fibres aux diamètres beaucoup plus variés que dans le cas des filaments continus. Ainsi, toutes les laines isolantes et les fibres céramiques renferment une partie des fibres de diamètre inférieur à  $3,0\ \mu\text{m}$ , qui risquent d'être inhalées si elles sont coupées en petits morceaux (moins de 200 à  $250\ \mu\text{m}$ ). L'exposition à ce genre de fibres vitreuses artificielles respirables sur le lieu de travail est bien documentée.

Plusieurs procédés sont utilisés pour la fabrication de la laine de verre, notamment le soufflage à la vapeur et le soufflage à la flamme. Le plus courant, cependant, est l'étirage centrifuge développé au milieu des années cinquante. Les procédés à rotors ont largement remplacé les procédés de soufflage direct dans la fabrication commerciale d'isolants en fibres de verre. Ils utilisent tous un tambour creux, ou panier centrifugeur, monté verticalement et dont la paroi est perforée de plusieurs milliers de trous uniformément répartis sur la circonférence. Le verre en fusion tombe à une vitesse contrôlée dans le centre du tambour d'où un distributeur le projette contre la paroi verticale perforée. La force centrifuge le disperse ensuite en étoile vers l'extérieur sous forme de filaments qui sortent de chaque perforation. On réduit alors ces filaments en insufflant un fluide à travers un ou plusieurs orifices disposés autour du tambour de façon concentrique. On obtient des fibres d'un diamètre moyen de 6 à  $7\ \mu\text{m}$ . Le fluide soufflé, qui agit vers le bas, permet ainsi le rétrécissement final et dirige également les fibres vers une surface de rassemblement située sous le tambour. En cours de route, les fibres sont aspergées de liant avant d'être réparties uniformément sur la surface de rassemblement (voir figure 84.13).

Dans les procédés par rotation, on obtient les fibres de laine de verre en faisant passer le verre en fusion à travers une série de petits orifices situés dans un tambour en rotation, puis en rétrécissant la fibre primaire par soufflage d'air ou de vapeur.

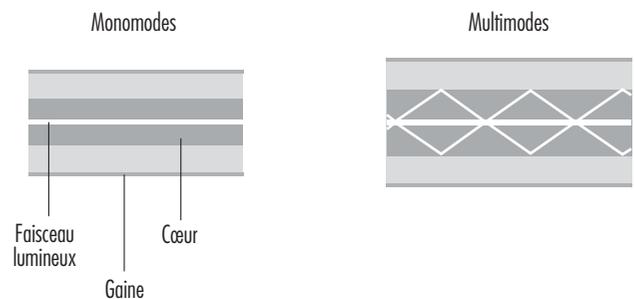
La laine minérale, quant à elle, ne peut être fabriquée par des tambours en rotation. Historiquement, on l'obtient par un procédé utilisant une série de mandrins horizontaux en rotation (ou rotors) montés en cascade et tournant très rapidement (voir figure 84.14).

Figure 84.14 • Fabrication de la laine minérale (de roche ou de laitier)



Une coulée de roches en fusion est continuellement amenée à l'un des rotors supérieurs et, à partir de celui-ci, au deuxième, et ainsi de suite. Le liquide en fusion est réparti uniformément sur la surface extérieure de tous les rotors. Des gouttelettes sont projetées de ceux-ci vers l'extérieur par la force centrifuge. Elles adhèrent à la surface des rotors par de longs fils qui, sous l'effet d'une élongation supplémentaire et d'un refroidissement simultané, se transforment en fibres. L'élongation entraîne naturellement une diminution de leur diamètre qui, à son tour, provoque une accélération du refroidissement. Le diamètre des fibres produites selon ce procédé est donc plus petit, mais aucune distribution normale autour de la valeur moyenne n'est à attendre.

Figure 84.15 • Fibres optiques monomodes et multimodes



## Les fibres optiques

Une fibre optique est constituée de deux filaments capillaires de verre transparent, disposés coaxialement, qui transmettent les rayons lumineux le long de son axe. Des *diodes électroluminescentes (DEL)* ou *diodes laser* convertissent les signaux électriques en signaux optiques qui sont transmis à travers l'élément interne du câble de fibre optique. L'indice de réfraction plus faible de la gaine extérieure permet aux signaux lumineux de se propager grâce aux réflexions totales qu'ils subissent à l'interface, entre le verre de cœur et le verre de gaine. Les fibres optiques sont conçues et fabriquées pour la propagation d'un ou de plusieurs faisceaux de lumière transmis simultanément le long du filament interne (voir figure 84.15).

Les fibres monomodes servent principalement pour la téléphonie, la télévision par câble et les réseaux informatiques sur les campus universitaires. Les fibres multimodes sont couramment utilisées pour le transfert de données et les réseaux locaux.

## Fabrication de la fibre optique

Il faut des matériaux et des procédés spéciaux pour fabriquer des fibres optiques répondant aux critères de conception fondamentaux: 1) un filament interne d'indice de réfraction élevé et un filament externe d'indice de réfraction plus faible; 2) une faible atténuation du signal ou une perte de puissance; 3) une dispersion ou un élargissement faibles du faisceau lumineux.

Le verre de silice très pur et d'autres verres (tels que verres au fluorure et aux métaux lourds et verres au chalcogénure) sont les principaux matériaux employés pour fabriquer des fibres optiques, à côté des composés polycristallins, des monocristaux, des guides d'onde creux et des matières plastiques polymères. Les matières premières doivent être relativement pures, avec de très faibles concentrations de métaux de transition et de groupes formant des radicaux hydroxyles (les taux d'impureté ne doivent pas dépasser quelques ppm). Lors de la fabrication, il est important de protéger le verre en formation de toute impureté qui pourrait être présente dans l'environnement de travail.

Pour la fabrication des fibres optiques, on procède à une opération initiale particulière en phase vapeur de production du verre qui est ensuite étiré en fibre. Les composés volatils de silice sont transformés en dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) par hydrolyse à la flamme, dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapour Deposition (CVD)) ou oxydation à haute température. Des dopants sont alors ajoutés au verre pour lui donner le gradient d'indice désiré. Les variantes de dépôt en phase vapeur partent du même produit, mais diffèrent par la méthode de transformation de ce produit en silice.

Ainsi, on peut utiliser l'une des méthodes de dépôt en phase vapeur suivantes pour la fabrication de fibres optiques à base de silice: 1) dépôt chimique en phase vapeur modifié (Modified Chemical Vapour Deposition (MCVD)); 2) dépôt chimique par plasma (Plasma Chemical Vapour Deposition (PCVD)); 3) dépôt extérieur en phase vapeur (Outside Vapour Deposition (OVD)); et 4) dépôt axial en phase vapeur (Vapour Phase axial Deposition (VAD)) (voir figure 84.16). Le tétrachlorure de silicium ( $\text{SiCl}_4$ ), le tétrachlorure de germanium ( $\text{GeCl}_4$ ) ou autres halogénures liquides volatils se transforment en gaz dès qu'ils sont chauffés, car ils ont une pression de vapeur très élevée. L'halogénure gazeux est amené dans une zone de réaction et transformé en particules de verre (voir également le chapitre n° 83, «L'industrie de la microélectronique et des semi-conducteurs»).

*Procédés MCVD et PCVD.* Un tube en verre de silice de haute qualité chauffé est fixé à une baguette de verre équipée d'une torche à hydrogène/oxygène sur toute sa longueur. Une alimentation en halogénures est placée à une extrémité de la baguette; à l'autre, un épurateur en élimine l'excès. Pendant que la torche traverse la longueur de la baguette, la flamme nettoie la surface. Différents réactifs sont ajoutés à la phase vapeur selon le produit en cours de fabrication. Lors du passage du mélange d'halogénures, on assiste à une réaction chimique dans la section du tube chauffé. Les halogénures convertissent en silice les particules de «sui» déposées sur l'intérieur du tube en aval de la torche. Les particules déposées sont frittées dans la couche de verre. Le procédé PCVD est semblable au procédé MCVD, si ce n'est que le mélange d'halogénures est envoyé par un système de barboteur et que l'on utilise des micro-ondes et non une torche pour transformer l'halogénure en verre.

*Procédés OVD et VAD.* Lors de la première étape du procédé de fabrication, le cœur et la gaine sont déposés en phase vapeur sur une baguette cible en rotation pour constituer une préforme de «sui». Le cœur se dépose d'abord, puis la gaine. Le cœur et la gaine se déposent en phase vapeur, la préforme est extrêmement pure. La géométrie de la fibre est déterminée pendant la phase de déposition. Lorsque la baguette cible est enlevée, la préforme est placée dans un four où elle se transforme en un verre solide et clair, et la cavité centrale se ferme. On envoie du gaz afin d'éliminer toute humidité résiduelle qui influe sur l'atténuation de la fibre (perte de signal optique lors de la transmission de la lumière le long de son axe). La préforme est alors lavée à l'acide fluorhydrique pour garantir la pureté du verre et éliminer les contaminants.

La préforme de verre solidifiée est placée dans une tour d'étirement pour donner un filament continu de fibre de verre. Elle est d'abord chargée dans un four d'étirement. Ensuite, son extrémité est chauffée et du verre en fusion s'écoule. Pendant la phase d'étirage, le verre passe à travers une filière qui assure que le diamètre intérieur (généralement mesuré en microns) correspond exactement aux spécifications. Le diamètre de la gaine doit être exactement conforme aux spécifications afin de limiter les pertes de signal lors des raccords. Le diamètre extérieur des gaines est utilisé comme guide pour aligner les cœurs des fibres. Ceux-ci doivent être très précisément alignés pour permettre une bonne transmission de la lumière.

On enduit alors les fibres de résine polyacrylate, par exemple, qui polymérise sous des lampes aux rayons ultraviolets. Les revêtements ont pour but de protéger la fibre optique de l'environnement pendant son utilisation. Les fibres optiques sont testées pour vérifier qu'elles sont conformes aux normes de fabrication en ce qui concerne leur résistance, l'atténuation et la géométrie. Des longueurs spécifiques de fibres sont enroulées sur des bobines selon les besoins du client.

Un certain nombre de risques potentiels peuvent se rencontrer lors de la fabrication des fibres optiques. Ils comprennent: 1) l'exposition à l'acide fluorhydrique (lors du nettoyage de la préforme); 2) l'énergie rayonnante et le stress thermique associés aux procédés de dépôt en phase vapeur; 3) le contact direct avec des surfaces brûlantes ou du matériau en fusion (les préformes de verre); 4) l'exposition aux polyacrylates (sensibilisants cutanés); 5) les piqûres et les coupures de la peau pendant la manipulation de la fibre; et 6) les divers risques physiques décrits auparavant.

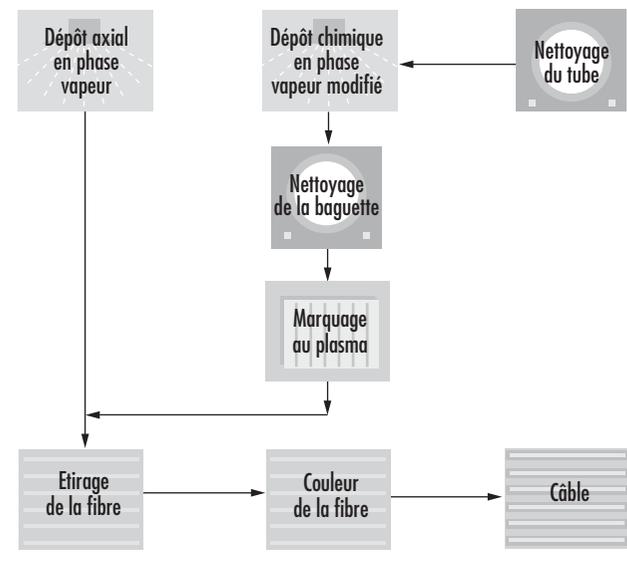
**George R. Osborne**

## Les fibres de céramiques réfractaires

La fabrication des fibres réfractaires se fait essentiellement par des méthodes de soufflage et de centrifugation, similaires à celles

employées pour les laines isolantes. Dans le procédé de soufflage à la vapeur, des matières premières comme l'alumine ou la silice sont fondues dans un four électrique et la matière en fusion est

Figure 84.16 • Schéma de fabrication d'une fibre optique



étirée et soufflée à la vapeur ou grâce à un autre gaz chaud sous pression. Les fibres produites sont rassemblées sur un crible.

Comme pour les fibres de roche ou de laitier, on obtient un grand nombre de fibres longues et soyeuses. Une coulée de matière en fusion passe dans des disques tournant à grande vitesse, puis est projetée tangentiellement pour former des fibres.

## L'industrie de la céramique

### Généralités

L'art de la céramique remonte à l'aube de l'humanité. Au cours du temps, de nombreux styles et techniques ont vu le jour dans différentes parties du monde. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'importation d'objets délicats et richement ornés en provenance d'Extrême-Orient influença fortement une industrie florissante dans plusieurs régions d'Europe. Environ quatre siècles auparavant, le Japon avait appris de la Chine l'art de la céramique. Sous l'impulsion de la révolution industrielle et de l'amélioration du niveau de vie en Europe occidentale, la production connut un essor rapide. De nos jours, chaque pays ou presque fabrique des objets destinés à sa consommation et, pour certains, leur exportation constitue un important débouché. Dans beaucoup de régions, la production a atteint un niveau industriel. Bien que les principes de base soient restés inchangés, les méthodes de fabrication ont considérablement évolué, en particulier le façonnage ou la mise en forme de l'objet, sa cuisson et les techniques de décoration. L'utilisation croissante de microprocesseurs et de robots a permis d'automatiser considérablement les unités de production. Il existe cependant encore partout de petits artisans.

### Les méthodes de fabrication

La poterie s'est d'abord faite à la main. On superpose des boudins d'argile que l'on agglomère par la pression des mains. On ramollit ensuite l'argile avec de l'eau. Lorsque tous les boudins adhèrent en une masse compacte, on façonne et on moule à la main.

Plus tard, le tour du potier fit son apparition. On place une masse d'argile au centre d'un plateau tournant et on la façonne, les mains mouillées. L'eau empêche que les mains ne collent à l'argile et conserve à celle-ci humidité et malléabilité. Les anses, les becs et autres parties saillantes sont ajoutés juste avant la cuisson.

De nos jours, on utilise souvent un moule pour réaliser une poterie de belle qualité aux parois très fines. On verse un mélange d'argile et d'eau très liquide, la barbotine, dans un moule de plâtre de Paris. Le plâtre absorbe l'eau, de sorte qu'il se dépose une mince couche d'argile sur la surface interne du moule. Quand la couche est suffisamment épaisse pour former les parois du vase, on jette ce qui reste de barbotine et on laisse la pièce humide dans le moule. En séchant, celle-ci se rétrécit légèrement et on peut alors la retirer. En général, les moules sont démontables.

Quand la pièce est parfaitement sèche, on la lisse et on la prépare en vue de la cuisson. On la place dans une boîte en argile réfractaire, la «cazette» ou «gazette», qui la protège des flammes et des gaz émis durant la cuisson, de la même façon qu'un four protège une miche de pain en train de cuire. Les cazettes sont superposées dans le four: c'est ce qu'on appelle l'engazettage et l'enfournement. Le four est une grande structure faite de briques réfractaires et entourée de veines d'air afin que les flammes du feu puissent complètement envelopper les pièces sans jamais entrer en contact avec elles, car la fumée les décolorerait.

La plupart des pièces sont cuites au moins deux fois. La première fois, on dit que la pièce est biscuitée; elle s'appelle alors le biscuit. Après cuisson, le biscuit est glacé. La glaçure est un enduit vitrifiable, transparent, que l'on applique sur une poterie pour la rendre brillante et imperméable. Les glaçures contiennent de la silice, un fondant pour abaisser la température de fusion (plomb, baryum, etc.) et des oxydes de métaux qui les colorent. Après application et séchage complet de la glaçure, la pièce est remise au four et cuite à une température très élevée à laquelle la glaçure fond et recouvre toute la surface.

### Les types de céramiques

- Le *grès-cérame* est formé à partir d'argile claire ou foncée. On le glace avant de le mettre au four ou en cours de cuisson, en ajoutant des sels, et on le cuit jusqu'à obtenir un objet dense et dur.
- La *porcelaine* est blanche, vitrifiée et translucide. L'objet glacé subit une seule cuisson à très haute température pour atteindre son aspect final.
- La *porcelaine de Chine* ressemble à la porcelaine. L'objet glacé subit une seule cuisson à température très élevée.
- La *porcelaine phosphatique* est une variété de porcelaine de Chine. Elle contient environ 40% de phosphates de calcium sous forme d'os calcinés et pulvérisés.
- La *terre cuite* est blanche ou presque blanche. Elle subit deux cuissons; le corps de l'objet fini reste poreux. La glaçure est semblable à celle de la porcelaine, mais faite avec des matériaux moins coûteux.
- La *faïence* est une terre cuite recouverte d'une glaçure fine qui sert à des fins ornementales ou décoratives. La production d'un objet blanc n'est habituellement pas recherchée, et les glaçures sont fréquemment colorées.

### Les procédés de fabrication

Les propriétés physiques d'une pâte céramique varient selon les composants qui entrent dans sa confection et les conditions de cuisson employées. C'est en fonction surtout de ses propriétés physiques que l'on choisit telle ou telle pâte, pour tel ou tel usage, mais on préfère généralement les pâtes blanches pour la vaisselle.

Selon leur future utilisation, on dote les produits industriels (réfractaires, isolateurs électriques, supports de catalyseurs, etc.) de propriétés physiques très diverses.

*Matières premières.* Les principaux composants de la pâte céramique, ainsi que leurs proportions usuelles respectives, sont indiqués au tableau 84.1. La syénite éololithique (néphélinifères) est parfois utilisée comme fondant, et l'alumine peut remplacer tout ou partie du quartz dégraissant dans certaines porcelaines. La cristoba-

Tableau 84.1 • Composants caractéristiques de la pâte céramique (%)

Pâte	Base plastique			Produits fondants		Produits dégraissants		
	Terre glaise	Kaolin	Grès	Roche	Feldspath	Quartz	Cendre d'os	Autres
Poterie	25	25		15		35		
Grès-cérame	30-40		25-35		20-25			20-30 (grog)
Porcelaine de Chine	20-25	20-25			15-25	25-30		
Porcelaine		40-50			20-30	15-25		
Porcelaine phosphatique		20-25		25-30			45-50	

lite (sable calciné) est employée comme dégraissant dans des cas particuliers, notamment dans l'industrie des carrelages muraux.

La composition de la pâte dépend en partie du procédé de fabrication et en partie des qualités souhaitées pour le produit fini. Une base plastique est indispensable pour les objets façonnés par voie humide; elle ne l'est pas dans les procédés de façonnage non plastique, comme le pressage à sec. Si la base plastique n'est pas essentielle, l'argile demeure cependant le composant principal de la plupart des produits céramiques, même de ceux qui sont pressés à sec.

Les céramiques industrielles ne figurent pas au tableau 84.1, car leur composition, très variée, va de la terre glaise à l'argile, sans fondant ni dégraissant, à la plupart des alumines mélangées avec de l'argile et sans fondant ajouté.

Pendant la cuisson, le fondant se vitrifie et lie les composants entre eux. A mesure que la quantité de fondant augmente, la température de vitrification diminue. Les dégraissants influent sur la résistance mécanique de l'objet avant et pendant la cuisson; on utilise traditionnellement le quartz (sous forme de sable ou de silex calciné) pour la fabrication de la vaisselle, sauf pour la porcelaine phosphatique, où il est remplacé par de la cendre d'os. L'alumine ainsi que d'autres charges non siliceuses largement employées dans l'industrie commencent également à l'être pour d'autres objets, y compris des céramiques ménagères.

*Fabrication.* La fabrication de la céramique comporte les phases suivantes:

- la préparation et le mélangeage des composants de la pâte;
- le moulage et le façonnage;
- la cuisson du biscuit (après séchage);
- l'application de la couverte ou glaçure (émaillage);
- la cuisson de la couverte ou glaçure (émaillage);
- la décoration.

Si la préparation (calcination, broyage et meulage du silex ou de la roche) peut se faire dans un établissement séparé, il est d'usage que l'ensemble des opérations suivantes s'effectue dans une seule et même usine. Dans la salle de la barbotine, les composants de la pâte sont mélangés dans l'eau; on obtient ensuite l'argile plastique par filtrage et malaxage; la barbotine de coulage est alors amenée à un état crémeux par délayage. On prépare la poudre destinée au pressage à sec par séchage et broyage.

Le tableau 84.2 montre les procédés classiques de fabrication. Au moulage, la pâte en suspension aqueuse est versée dans un moule absorbant et la pièce est retirée après séchage partiel. Le façonnage au tour de potier est désormais rare dans la production industrielle. Le façonnage par étalement à l'extérieur ou à l'intérieur d'un moule en plâtre (calibrage), la pièce étant séparée du moule après séchage, est devenu le procédé quasi universel de la fabrication de la vaisselle. Le pressage, ou l'extrusion, de l'argile

plastique est principalement limité aux céramiques industrielles. Les articles en poudre pressée sont obtenus par compactage à la main ou par pressage mécanique de la poudre préséchée qui constituera la pâte.

Après la façonnage, l'objet est séché puis lissé et essuyé avec un tissu ou une éponge. Il est alors prêt pour l'opération suivante, la cuisson du biscuit.

Après la cuisson du biscuit, la glaçure est appliquée par pulvérisation ou immersion, cette dernière pouvant être manuelle ou mécanique. L'objet glacé est alors à nouveau cuit. Parfois, comme dans le cas des céramiques sanitaires blanches, la glaçure est appliquée sur l'argile séchée et il n'y a qu'une seule cuisson.

La décoration se fait sous la glaçure ou par-dessus; elle peut être peinte à la main ou imprimée mécaniquement ou par décalcomanie. Si elle se fait sur la glaçure, la pièce doit subir une troisième cuisson, parfois davantage en fonction des différentes couleurs.

Enfin, on procède au tri et à l'emballage avant l'expédition. La figure 84.17 indique les étapes auxquelles sont soumis divers types de céramiques au cours de leur fabrication.

## Les carreaux en céramique

### Généralités

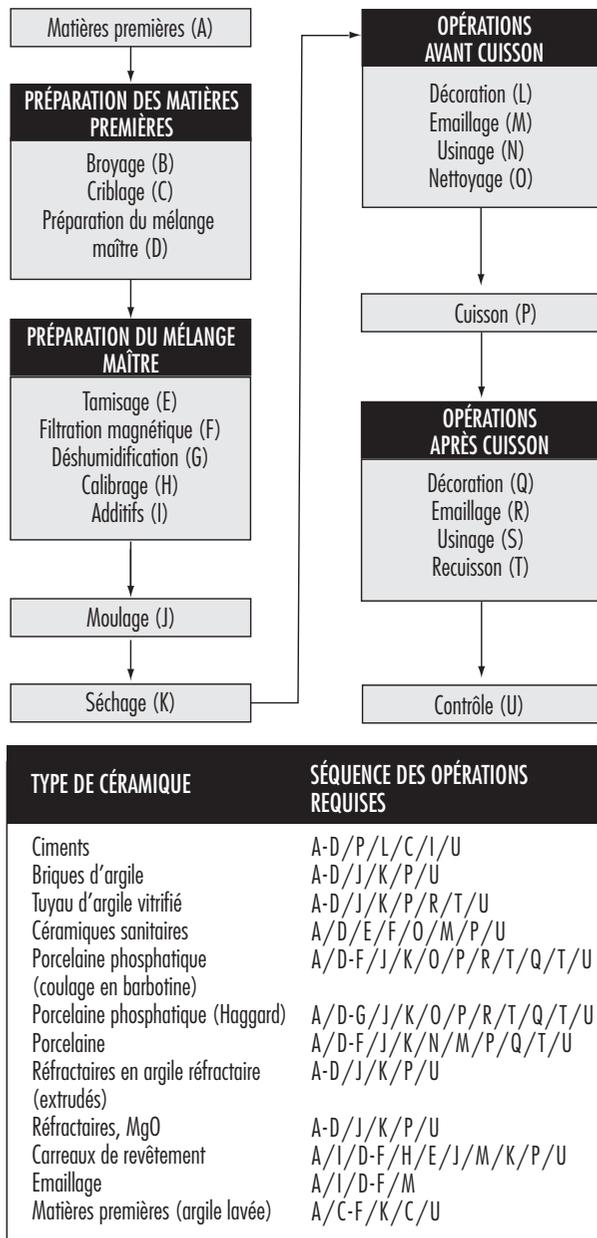
Le mot céramique désignait autrefois l'art ou la technique de fabriquer des poteries. Son étymologie remonte au grec *keramos*, signifiant «potier ou poterie», lui-même dérivé d'une racine sans-krite signifiant «brûler». Dans le sens où l'employaient les Grecs, il s'agissait simplement de «matière cuite» ou «terre cuite». A l'origine, donc, ce terme désignait un objet obtenu par l'action du feu sur de la terre.

Dans le cadre de cet article, nous entendons par «céramique traditionnelle» les matériaux de construction, ainsi que les objets à usage domestique ou industriel. Bien que le mot céramique évo-

Tableau 84.2 • Procédés de fabrication

Produits	Procédés habituels
Vaisselle	Façonnage d'argile plastique; moulage
Sanitaires	Moulage
Carreaux	Pressage à sec (revêtement de mur ou de sol, carreaux vitrifiés); pressage d'argile plastique (dalles de revêtement de sol)
Articles industriels	Pressage à sec; pressage d'argile plastique

Figure 84.17 • Fabrication des céramiques par types



Source: Haber et Smith, 1987.

que des procédés artisanaux, cette industrie fait souvent appel à une technologie de pointe. Une concurrence sévère parmi les fabricants a contribué à affiner les techniques et à réduire les coûts de fabrication par l'introduction d'outillage et de machines complexes, secondés par des procédés assistés par ordinateur.

Les céramiques les plus anciennes sont à base d'argile. Les premiers potiers ont découvert que sa plasticité permettait de la façonner. Afin d'en réduire le retrait et le risque de fêlure, on y a ajouté du sable et des minéraux. Aujourd'hui, on trouve dans les pâtes à base d'argile des poudres de silice ou des minéraux alcalins qui agissent comme fondant. Traditionnellement, l'argile sert de plastifiant et de liant pour d'autres composants.

**Le développement de l'industrie**

La production de carreaux en argile sèche et cuite remonte à des origines très anciennes, aux temps où le Moyen-Orient était la Mésopotamie. L'industrie des carreaux de céramique fine s'est développée essentiellement en Europe et, dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, on y a produit des carreaux de pavement (pour les sols) et de revêtement (pour les murs) à l'échelle industrielle. Le secteur s'est encore développé après la seconde guerre mondiale. C'est en Europe (Italie et Espagne, en particulier), en Amérique latine et en Extrême-Orient que se concentre aujourd'hui la production industrielle de carreaux de pavement et de revêtement.

L'introduction de nouvelles technologies, l'automatisation et l'intégration de stades de production dans le processus de fabrication ont permis un essor important de ce secteur d'activité à partir des années quatre-vingt. Il en est résulté des gains de productivité et une meilleure efficacité en même temps qu'une réduction de la consommation d'énergie et des coûts. La fabrication des carreaux à pâte humide ou sèche est à présent continue, et beaucoup d'usines sont aujourd'hui presque entièrement automatisées. Parmi les innovations les plus marquantes des années quatre-vingt, il faut citer le broyage humide, le séchage par pulvérisation, le pressage à sec à haute pression, les techniques de séchage au tambour et de cuisson rapide.

On estime que le marché du carreau en céramique aux Etats-Unis (production plus importations) a augmenté à un taux composé annuel de 9,2% entre 1992 et 1994, les ventes étant estimées à 1,3 milliard de dollars en 1994. En même temps, le volume des ventes a augmenté au taux composé annuel de 11,9% pour atteindre 0,1 milliard de mètres carrés. Ces chiffres sont à comparer à une progression du marché de 7,6% en valeur et de 6,9% en volume entre 1982 et 1992.

**La classification des carreaux de céramique**

**La céramique rouge et la céramique blanche**

On trouve sur le marché de nombreux types de céramique. Ils se distinguent par la texture de la surface, la couleur de la pâte (blanche ou rouge), la technique de fabrication, les matières premières et l'utilisation finale. La quantité de composés ferreux présents dans la pâte donne aux céramiques leur couleur «blanche» ou «rouge». En réagissant avec les autres composants de la pâte, ils donnent une couleur plus ou moins intense et modifient le comportement de la pâte durant la cuisson.

Etant donné l'extrême diversité des carreaux, de leur mode de fabrication et des caractéristiques qui en découlent, il est pratiquement impossible d'établir une classification complète et exhaustive. Dans ce chapitre, on se référera aux normes européennes (EN) et à celles de la Société américaine pour l'essai des matériaux (American Society for Testing and Materials (ASTM)).

Les normes européennes classent les carreaux en céramique exclusivement selon leur pouvoir d'absorption de l'eau (qui est en corrélation directe avec la porosité) et leur mode de façonnage (extrusion ou pressage). Les méthodes de façonnage sont classées comme suit:

- *procédé A de fabrication* (carreaux extrudés pour sols). Ce procédé comprend les carreaux avec amorce de rupture et les carreaux extrudés individuellement;
- *procédé B de fabrication* (carreaux pressés à sec pour sols et murs).

La norme européenne EN 87, approuvée en novembre 1981 spécifie que «les carreaux en céramique pour sols et murs sont des matériaux de construction destinés généralement au revêtement des sols et des murs, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, quelles qu'en soient la forme ou la taille».

L'Institut américain de normalisation (American National Standards Institute (ANSI)), dans ses spécifications pour les carreaux en céramique (ANSI, 1988), donne les définitions ci-après :

- *Carreau de mosaïque*: carreau façonné soit par pressage, soit sous forme de pâte plastique mesurant habituellement de 6,4 à 9,5 mm d'épaisseur et ayant une aire inférieure à 39 cm<sup>2</sup>. Composés de porcelaine ou d'argile naturelle, les carreaux de mosaïque sont unis et peuvent rester en l'état ou comporter un mélange abrasif.
- *Carreau de décoration murale*: carreau vernissé, de faible épaisseur, habituellement non vitreux. Sa faible résistance aux chocs le destine plutôt à la décoration intérieure des murs des lieux d'habitation.
- *Dalle de sol*: carreau en porcelaine, vernissé ou non, en argile naturelle. Il est formé par pressage à sec et a une aire d'au moins 39 cm<sup>2</sup>.
- *Carreau en porcelaine*: carreau mosaïque ou dalle, de matière très dense, étanche, à grains fins et lisses, très bien calibré, formé par pressage à sec.
- *Dalle de pavement*: vernissée ou non, elle est formée par extrusion à partir d'argile naturelle ou de schiste, et a une aire d'au moins 39 cm<sup>2</sup>.
- *Carreau mural*: carreau vernissé, adapté à un usage intérieur et généralement non vitrifié. Il n'est pas destiné à résister à des chocs excessifs ou à être exposé à de forts écarts de température (gel et dégel, par exemple).
- *Carreau individuel fin*: carreau non vernissé (carreau de mosaïque, dalle de pavement, dalle de sol) et carreau vernissé (carreau mural vernissé, carreau mosaïque vernissé, dalle de pavement vernissée, dalle de sol vernissée) (ANSI, 1988).

Les carreaux sont fabriqués à partir de céramique selon des procédés types. Les carreaux pour revêtement de sols et de murs sont préparés à partir d'un mélange d'argile, de sable, de fondants, d'agents colorants et d'autres composants minéraux. Ils sont soumis à une série d'opérations: concassage, criblage, malaxage et mouillage. Ils sont façonnés par pressage, extrusion, moulage, etc., généralement à température ambiante, séchés puis cuits à haute température. Ils peuvent être vernissés, non vernissés ou engobés. Les glaçures sont des enduits d'aspect vitreux qui rendent les carreaux imperméables et brillants; les engobes sont mats, à base d'argiles, et peuvent être poreux. Les carreaux vernissés destinés au revêtement des sols et des murs subissent une cuisson simple ou double.

Les pâtes des céramiques traditionnelles sont façonnées selon diverses techniques. Le choix de chacune dépend de nombreux facteurs: les caractéristiques du matériau, la taille et la forme des différentes parties, leur spécification, la quantité produite et les habitudes de la région de production.

Les pâtes à base d'argile sont des mélanges hétérogènes d'un ou de plusieurs types d'argile et d'une ou de plusieurs poudres non argileuses. Avant d'atteindre leur forme définitive, ces poudres subissent une série d'opérations avant et après la cuisson (voir figure 84.17).

Pour la plupart des pâtes traditionnelles, les techniques de façonnage peuvent se classer ainsi: moulage en pâte tendre, moulage en pâte rigide, pressage et coulage.

Le pressage est utilisé pour réarranger et redistribuer les matières premières en une configuration plus compacte. Le comportement rhéologique des pâtes à base d'argile résulte de l'interaction entre les minéraux de l'argile et l'eau qui donne au mélange sa plasticité. Dans les pâtes sans argile, cet effet est obtenu par addition de plastifiant.

## Les céramiques industrielles

### Généralités

Les céramiques diffèrent des autres matériaux industriels (métaux, plastiques, bois, textiles) par un certain nombre de propriétés. L'aspect constitue sans doute la distinction la plus évidente pour un décorateur ou un futur utilisateur, chaque pièce possédant une forme et une dimension uniques. Après cuisson, seul un meulage très coûteux permet de retoucher les céramiques; elles ne sont, par conséquent, généralement pas retouchées. Mis à part le simple carreau, la barre ou le tube de petites dimensions, on ne peut ni vendre les céramiques au centimètre ou au mètre, ni les couper sur mesure.

Toutes les caractéristiques utiles, formes et dimensions comprises, doivent être fournies à l'avance dès les premières étapes de la fabrication. Bien qu'elle soit soumise à diverses contraintes thermiques et mécaniques durant la fabrication et jusqu'au stade final de pose et de mise en œuvre, la pièce doit garder ses propriétés intrinsèques. Si une céramique ne résiste pas à l'usage (en raison, par exemple, d'une fêlure à la suite d'un choc, d'un choc thermique, d'une perturbation diélectrique, d'abrasion ou de corrosion lors de la fusion), il faut généralement la remplacer, car elle est difficilement réparable.

On a réalisé de grands progrès dans la compréhension et la maîtrise des propriétés de la céramique, ainsi que dans son utilisation pour maintes applications nouvelles, hautement techniques et spécifiques. L'industrie de la céramique en général et son secteur technique et électronique en particulier ont conçu des méthodes de production et de contrôle pour fabriquer en grande quantité des formes très élaborées à partir de pâtes possédant des propriétés électriques, magnétiques ou mécaniques rigoureusement contrôlées tout en maintenant des dimensions suffisamment précises pour que la céramique se mélange sans trop de problèmes avec d'autres composants.

De nombreux objets en céramique sont des articles courants produits en grande quantité. Les fabricants ont généralement en stock des céramiques de toutes compositions et de toutes tailles pour tous usages: briques et éléments réfractaires, creusets, moules, cheminées de four, isolants et condensateurs diélectriques, tubes de protection à couple thermoélectrique, joints hermétiques et plaques de fibres. Il est habituellement plus rapide et plus économique d'utiliser des articles disponibles. Si ce n'est pas possible, la plupart des céramistes sont prêts à les fabriquer sur mesure. Certaines contraintes — demander, par exemple, telle propriété ou telle combinaison de propriétés, de formes ou de dimensions — restreignent les paramètres au niveau des composants, de la microstructure et de la configuration de la céramique. Presque toutes les fabriques de céramique emploient des ingénieurs et des concepteurs hautement qualifiés qui travaillent, le cas échéant, avec les clients.

### Les marchés

Le débouché principal pour le marché de la céramique de haute précision reste toujours l'électronique; toutefois, on s'emploie partout dans le monde à trouver, grâce à des programmes dynamiques de recherche-développement, de nouvelles applications et des moyens d'améliorer les propriétés de la céramique afin d'accéder à de nouveaux marchés.

Le Japon, les États-Unis et l'Europe occidentale produisent des céramiques de pointe. Les matières premières utilisées se négocient sur le marché international, principalement sous forme de poudres, mais on les traite également beaucoup sur place.

Les céramiques industrielles servent dans de nombreuses applications dont les plus importantes sont:

- Les *oxydes*. Les principaux oxydes employés de nos jours sont l'alumine pour les bougies d'automobiles, les pièces et supports où l'usure est importante; la zircone (oxyde de zirconium ou  $ZrO_2$ ) pour les détecteurs d'oxygène, comme composant des pastilles piézoélectriques au titanate-zirconate de plomb (PZT) et pour les enduits dans les applications d'usure, où la dureté est une qualité recherchée, et de barrière thermique; les titanates dans les condensateurs au titanate de baryum et les pastilles piézoélectriques au PZT; les ferrites des aimants permanents, têtes magnétiques d'enregistrement, appareils de mémoire, sondes de température et pièces de moteurs électriques.
- Les *carbures* et les *nitrures*. Les carbures (principalement carbures de silicium et de bore) sont utilisés pour leur résistance à l'usure alors que les nitrures (principalement nitrures de silicium et Sialon®), également recherchés pour cette même propriété, entrent aussi dans la fabrication des outils de coupe. Le nitrure d'aluminium, dont la conductivité thermique est élevée, est le premier composant pour une partie du marché des substrats électroniques, dominé par l'alumine.
- Les *céramiques de mélanges d'oxydes*. La recherche-développement concentre ses efforts sur un grand nombre de nouvelles applications qui ont toutes un potentiel énorme parmi lesquelles on peut citer: 1) les céramiques pour superconducteurs; 2) les céramiques pour les piles à combustible à oxyde solide; et 3) les céramiques comme composants des moteurs thermiques.

Les céramiques pour superconducteurs sont faites à partir d'un nombre de mélanges d'oxydes comprenant l'yttrium, le baryum, le cuivre, le strontium et le cuivre ( $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ,  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ ,  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ ) stabilisés avec l'oxyde de plomb. Les céramiques pour les piles à combustible à oxyde solide sont basées sur les conducteurs ioniques dans lesquels la zircone stabilisée ultrapure est aujourd'hui le matériau de choix. Composés de carbure de silicium, de Sialon® et de zircone, les éléments en céramique des moteurs thermiques en cours d'étude sont fabriqués soit en monophasé, soit en tant que composites céramique-céramique ou à matrice métallique.

### Les procédés de fabrication

#### Le développement des techniques de fabrication

*Innovations.* Les efforts de recherche-développement aboutissent à la mise au point de nouvelles techniques pour la fabrication de matériaux céramiques. Le marché des céramiques dérivées de précurseurs était estimé à 2 millions de dollars E.-U. en 1989, le plus important étant le marché en dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapour Deposition (CVD)). D'autres secteurs en expansion sont l'infiltration en phase vapeur (Chemical Vapour Infiltration (CVI)), les procédés sol-gel et la pyrolyse sur polymères. Parmi les produits fabriqués avec succès à partir de ces techniques se trouvent les fibres céramiques continues, les matériaux composites, les membranes et les poudres ultrapures/à haute activité.

Les procédés utilisés pour transformer ces matières premières en produits finis nécessitent des traitements supplémentaires des poudres (notamment la granulation et l'atomisation-séchage) avant de façonner les pièces crues qui sont alors cuites dans des conditions très précises. Le façonnage comprend le moulage sous pression, le pressage isostatique, l'engobage, l'adoucissage, l'extrusion, le moulage par injection, le pressage à chaud, l'infiltration par gaz pressurisé (Hot Isostatic Pressing (HIP)), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), etc.

*Additifs chimiques favorisant les procédés de fabrication des céramiques.* Afin d'assurer au produit fini les propriétés nécessaires avec une efficacité maximale, chaque étape de la fabrication est surveillée attentivement et des produits chimiques spécifiques sont choisis

pour optimiser le traitement de la poudre et la formation du vert (ou produit cru). Ces produits chimiques favorisent la granulation, servent de floculants ou de liants, de lubrifiants pour limiter les effets d'usure lors du pressage avec matrice et de plastifiants pour faciliter l'extrusion et le moulage par injection. Une liste en est donnée au tableau 84.3. Ces composants, qui jouent un rôle important lors de la fabrication, sont brûlés lors de la cuisson et n'entrent pas dans la composition chimique finale des produits. Le processus de combustion doit être soigneusement contrôlé afin d'empêcher tout dépôt résiduel de carbone dans les produits finis, et les travaux de recherche-développement visent constamment à trouver des moyens de réduire la quantité d'additifs utilisés.

L'influence de l'industrie des céramiques de pointe (ou néocéramiques) sur l'industrie traditionnelle va bien au-delà de la création de produits et de la mise au point de techniques en vue de nouvelles applications. On peut en effet s'attendre à ce que l'industrie traditionnelle utilise de nombreux matériaux et procédés technologiques de pointe qui lui permettront de réduire les coûts de fabrication, d'améliorer la qualité et de proposer à l'utilisateur des produits toujours plus performants.

#### Les matières premières

Certaines matières premières jouent un rôle fondamental dans l'industrie de la céramique, employées telles quelles ou comme base de matériaux améliorés:

Tableau 84.3 • Additifs chimiques permettant d'améliorer le traitement des poudres et la mise en forme des céramiques

Matériel	Application ou fonction
Poly(alcool vinylique)	Liant pour céramiques de pointe
Polyéthylène glycol	Liant pour céramiques de pointe
Polyacrylate de sodium	Défloculant pour moulage de barbotine
Polyamide tertiaire	Liant pour pressage à sec
Amidon mélangé avec de l'alumino-silicate sec colloïdal	Liant pour moulage sous vide
Alumine cationique plus floculant organique	Liant pour moulage sous vide
Amidon de maïs cationique pré-gélatinisé	Floculant pour lier la silice colloïdale et l'alumine
Carboxyméthylcellulose de sodium très pur	Liant
Silicate d'aluminium et magnésium inorganique colloïdal	Agent de suspension
Carboxyméthylcellulose de sodium de viscosité moyenne ajouté au Veegum®	Agent de suspension, stabilisateur de viscosité
Polyélectrolyte d'ammonium	Agent de dispersion pour le moulage de barbotine servant aux céramiques électroniques
Polyélectrolyte de sodium	Agent liant de dispersion pour les pâtes à séchage par pulvérisation
Cellulose microcristalline et carboxyméthylcellulose de sodium	Épaississant
Polysilazane	Facilitateur, liant et précurseur pour céramiques de pointe

- la silice;
- l'argile;
- l'alumine;
- la magnésie;
- l'oxyde de titane;
- l'oxyde de fer;
- le zircon/la zircone.

Nous nous attacherons ici aux propriétés de la silice, de l'alumine, du zircon et de la zircone.

La silice, outre son utilisation dans les céramiques réfractaires et les céramiques fines, est le matériau de base pour l'obtention de silicium élémentaire, de carbure de silicium et de tétrachlorure de silicium. Le silicium à son tour permet d'obtenir du nitrure de silicium, et le tétrachlorure de silicium est le précurseur de nouveaux dérivés organiques qui peuvent être pyrolysés dans des conditions contrôlées pour donner du carbure de silicium et du nitrure de silicium de haute qualité.

En dépit de leur tendance à l'oxydation, le nitrure de silicium et ses dérivés Sialon®, tout comme le carbure de silicium, peuvent présenter nombre de propriétés recherchées par le marché du moteur thermique. La silice et les matériaux céramiques qui en sont dérivés sont abondants dans la croûte terrestre, et l'on peut théoriquement s'en procurer facilement dans le monde entier. Dans la pratique, toutefois, la production du silicium et du carbure de silicium exige beaucoup d'énergie. Par conséquent, la fabrication de ces matériaux se limite aux pays ayant une énergie électrique peu coûteuse et facilement disponible.

L'alumine est présente dans toute la croûte terrestre, dans les minéraux silico-alumineux. Des considérations économiques imposent de l'extraire de la bauxite par le procédé Bayer. La bauxite, abondante dans la zone équatoriale à différents états de pureté, se classe en deux groupes: minerai réfractaire et minerai métallurgique.

La bauxite de qualité réfractaire vient de Chine et de Guyane sous forme de calcinat obtenu sous haute température: diaspore ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) en Chine et gibbsite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) en Guyane. Durant la calcination, il se forme une phase complexe d'amalgame de corindon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mullite, verre de silice et, à un degré moindre, titanate d'aluminium. La consommation mondiale de bauxite réfractaire dépasse 700 000 tonnes par an.

La bauxite de qualité métallurgique est extraite en Australie, en Jamaïque et en Afrique de l'Ouest. Elle a des teneurs variables en alumine, selon la présence d'impuretés comme l'oxyde de fer et la silice. On extrait l'alumine du minerai par dissolution à l'aide d'hydroxyde de sodium. La bauxite est broyée en présence d'une solution de soude concentrée, puis lavée sous pression. L'alumine se dissout sous forme d'aluminate; les résidus, séparés par décantation et lavage à contre-courant, constituent des boues rouges. L'hydroxyde d'aluminium pur est précipité à partir de l'aluminium de sodium puis calciné pour obtenir différentes qualités d'alumine.

Les alumines très pures utilisées dans l'industrie de la céramique obtenues par le procédé Bayer sont classées en alumine tabulaire, alumine fondue et alumine calcinée.

L'alumine tabulaire est produite par calcination à haute température (~2 000 °C ou 3 630 °F) d'alumine calcinée à basse température dans de grands fours rotatifs fonctionnant au mazout. L'alumine fondue est produite par fusion électrique de l'alumine calcinée. Après avoir été concassées et calibrées, l'alumine tabulaire et l'alumine fondue sont vendues sous cette forme à l'industrie du réfractaire pour être utilisées dans une grande gamme de produits de haute qualité, comme dans les réfractaires moulés en continu (par exemple, busettes à tiroir), réfractaires monolithiques pour les hauts-fourneaux et l'industrie pétrochimique.

Les poudres d'alumine calcinée sont les principales matières premières de l'industrie des néocéramiques destinées aux applications techniques et électroniques. Elles sont produites avec une grande variété de teneurs selon des spécifications rigoureuses sur le plan de la chimie, de la granulométrie et du type cristallin en vue d'applications très diverses des produits finis.

Le marché mondial des alumines de haute qualité est bien établi. La plupart des fabricants de céramiques possèdent leurs propres stations de broyage et de séchage par atomisation. Il y a bien sûr une limite à la croissance de ces systèmes et un besoin incessant de procurer une alumine adaptée à l'utilisation de manière à fabriquer le meilleur produit à un prix acceptable. L'alumine est un composant important de la céramique que l'on trouve à un état de pureté presque parfait. Sa position dominante tient à ses propriétés et à son coût relativement bas, qui est dû à la forte demande de l'industrie de l'aluminium.

*Zircon et zircone.* Présent dans le sable des plages d'Australie, d'Afrique du Sud et des Etats-Unis, le zircon ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ) est le minerai de base pour l'obtention de la zircone. Le zircon extrait du sable des plages contient ~2% d'oxyde de hafnium et des traces de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,5%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,1%) et  $\text{TiO}_2$  (0,1%). De plus, tous les zircons contiennent des traces d'uranium et de thorium. Le zircon est broyé pour produire des poudres de particules de différentes granulométries que l'on utilise dans le moulage, les fonderies et les réfractaires, ainsi que pour opacifier les glaçures des céramiques fines.

Le zircon est aussi la principale source de zircone. Il peut être chloré en présence de carbone pour produire des tétrachlorures de zirconium et de silicium qui sont ensuite séparés par distillation. Le tétrachlorure de zirconium peut servir directement à la préparation de la zircone ou de la matière de base pour l'obtention d'autres composés du zirconium. Les frittages avec des alcalis ou des oxydes alcalino-terreux sont utilisés pour décomposer le zircon. La silice est séparée des produits de décomposition par lessivage à l'eau, l'hydroxyde de zirconium est purifié par dissolution acide et reprécipitation. On obtient alors la zircone en calcinant l'hydroxyde. Le zircon est également transformé en zircone et en silice dans un plasma à 1 800 °C (3 270 °F) avec refroidissement rapide pour éviter un amalgame. On élimine la silice libre par dissolution dans de l'hydroxyde de sodium. La zircone fondue est produite dans des fours à arc électrique à partir de baddeleyite ou de zircon/carbone. Avec cette dernière méthode, la composante silice du zircon est réduite par un procédé carbothermique en monoxyde de silicium qui se volatilise avant la fusion de la zircone résiduelle.

### Résumé

L'industrie de la céramique industrielle est très variée et de nombreux traitements ont lieu sur place. La plupart des opérations finales de fabrication se font dans des atmosphères qui s'apparentent à celles des fonderies. Les matériaux mis en œuvre à ce stade dégagent une fine poussière susceptible d'être nocive. Ils sont ensuite portés à de très hautes températures et fondus ou frittés en de petites pièces de différentes formes. L'industrie de la céramique connaît donc nombre des problèmes inhérents à toutes les industries de haute température.

### Les briques, les tuiles et les carreaux

#### Généralités

Depuis l'aube des temps, l'être humain a utilisé l'argile presque partout dans le monde comme matériau de construction sous forme de briques, tuiles et carreaux. Fabriqués et cuits selon les règles, ces matériaux résistent mieux que certaines roches aux intempéries, ainsi qu'aux variations importantes de température et d'humidité. La brique est un parallélépipède rectangle dont la

taille diffère légèrement d'une région à l'autre mais qui, pour l'essentiel, peut être manipulée facilement d'une seule main par un maçon; les tuiles sont des plaques fines, plates ou rondes; les carreaux sont employés comme revêtement des sols.

L'industrie de la brique est très fragmentée. Partout, on trouve de petits fabricants locaux. Les briqueteries tendent à s'adresser à des fournisseurs et à des marchés locaux à cause du coût de transport du produit fini. En 1994, on dénombrait 218 briqueteries aux États-Unis et, en 1992, le nombre de producteurs d'articles à base d'argile s'élevait à 182 au Royaume-Uni. Les briqueteries sont généralement situées près des dépôts d'argile afin de réduire le coût du transport de la matière première.

Aux États-Unis, les briques sont principalement utilisées dans la construction résidentielle, comme matériau porteur ou matériau de façade. L'industrie de la brique est si intimement liée à celle du logement qu'elle en est fortement tributaire et qu'elle dépend presque entièrement de la construction résidentielle et non résidentielle.

### Les procédés de fabrication

#### Les matériaux et les procédés

Le matériau de base est l'argile de différents types avec des mélanges de glaises, schistes et sable, selon les ressources et les besoins locaux qui donnent au produit texture, plasticité, régularité, retrait et couleur voulus.

Aujourd'hui, l'extraction de l'argile est souvent entièrement mécanisée. La fabrication s'effectue en général au voisinage du lieu d'extraction bien que, dans les grandes unités, l'argile soit parfois transportée dans des godets ou sur des convoyeurs à bande. Selon sa composition et le produit final, l'argile subit alors différentes transformations qui comprennent le concassage, le broyage, le criblage et le malaxage. La figure 84.18 montre le schéma de la fabrication des briques.

L'argile pour briques extrudées est concassée par des rouleaux; on ajoute de l'eau dans un mélangeur. Le mélange est à nouveau broyé puis envoyé dans un malaxeur à axe horizontal. L'argile plastique extrudée est alors coupée à dimension sur la table de coupe au fil. Le matériau plastique semi-sec ou rigide est produit par laminage et criblage puis envoyé vers des presses mécaniques. Certaines briques sont encore façonnées à la main.

Si on utilise un matériau plastique, il faut faire sécher les briques au soleil et à l'air ou, plus souvent, dans des fours régulés avant de les cuire. Les briques en plastique semi-sec ou rigide peuvent être cuites immédiatement. La cuisson peut s'effectuer dans des fours circulaires, souvent chargés à la main, ou dans des fours tunnels, chargés mécaniquement. Le combustible utilisé dépend des ressources disponibles localement. Une glaçure de finition est appliquée sur certaines briques décoratives.

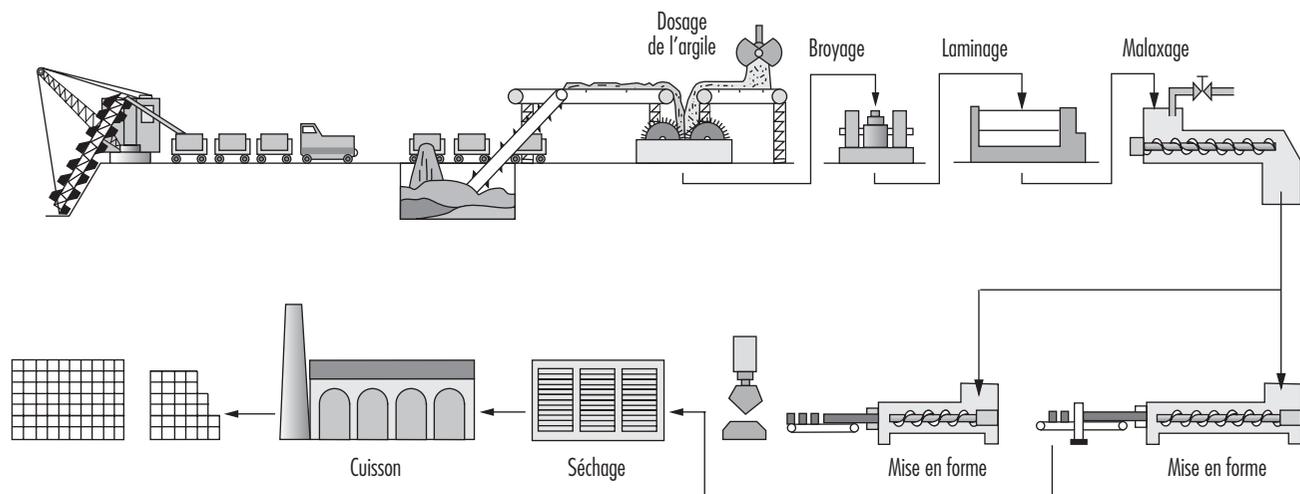
### Les matériaux réfractaires

#### Généralités

Les matériaux réfractaires évoquent traditionnellement des composés non métalliques résistant à la corrosion par des gaz, des liquides ou des solides à de hautes températures. Ils doivent résister au choc thermique causé par un échauffement ou un refroidissement rapide, aux fissures imputables aux contraintes thermiques, à la fatigue mécanique due au contact avec d'autres matériaux et aux attaques chimiques activées par la température élevée de l'environnement. On les emploie dans la fabrication de la plupart des produits céramiques et, plus spécialement, dans les fours, séchoirs, fourneaux et pièces de moteur soumises à de hautes températures.

Ce n'est que récemment que des matériaux non minéraux sont entrés dans la composition des réfractaires, bien que les minéralogistes aient toujours orienté leurs recherches dans ce domaine. Depuis le Moyen Âge, les métallurgistes avaient réalisé des expériences en utilisant les scorifications acides et basiques et avaient inventorié certains avantages des deux méthodes. Les artisans des réfractaires avaient en conséquence mené des expériences avec du quartzite, d'autres minéraux de silice presque pure et de la magnésite — qui renferme surtout du carbonate de magnésium ( $MgCO_3$ ) — qu'ils calcinaient pour obtenir de la magnésie ( $MgO$ ). Avec l'invention du convertisseur Bessemer pour la fabrication de l'acier en 1856, associant des températures de fonctionnement supérieures à  $1600\text{ }^\circ\text{C}$  et la scorification acide, les réfractaires en silice «acide» étaient quasiment nés. Lorsque le four à foyer ouvert Siemens, fonctionnant à des températures encore plus élevées, fit son apparition en 1857 et que la fabrication de l'acier se concentra alors sur la scorification basique, on introduisit bientôt des recouvrements intérieurs en magnésite «basique». Pendant la première guerre mon-

Figure 84.18 • Fabrication des briques et des carreaux



diale, des réfractaires basiques à base de dolomie calcinée ( $MgO-CaO$ ) furent mis au point quand les alliés furent coupés de leurs sources d'approvisionnement européennes en magnésite. Plus tard, avec la mise en valeur d'autres ressources minérales dans le monde entier, la magnésite reprit sa place.

Parallèlement, depuis 1863, le Royaume-Uni fabriquait des briques au carbone lié. On finit par les employer dans les hauts-fourneaux des aciéries, qui fonctionnaient à des températures de plus en plus élevées. Elles furent aussi très vite utilisées dans les cellules de Hall-Héroult pour la production de l'aluminium (1886).

Pendant quelque cinq millénaires, la chaux fut fabriquée dans des fours en argile, puis en briques réfractaires. Après l'introduction des fours rotatifs, en 1877, la fabrication du ciment Portland nécessita un nouveau type de réfractaire. Les premiers garnissages furent en mâchefer ciment-ciment. Plus tard, cette industrie utilisa des réfractaires plus résistants.

Les fours à récupération et à régénération, apparus dans les années mille huit cent cinquante dans la toute jeune industrie de l'acier, furent introduits dans la métallurgie des non-ferreux et dans la fabrication du verre à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Là aussi, les réfractaires en argile avaient fait leur temps. Les garnissages en magnésite furent utilisés dans les convertisseurs en cuivre à partir de 1909 et, une dizaine d'années plus tard, dans les premières cuves en verre modernes. Les fours à arc, utilisés d'abord pour la fabrication de l'acier en 1853, se répandirent après 1890. Une unité traitant environ 100 tonnes, installée aux Etats-Unis en 1927, avait un garnissage en magnésite.

Le besoin de réfractaires plus performants ne se fit sentir qu'avec l'apparition des fours à arc à trois phases, dans les années quarante, période où fut introduit le soufflage d'oxygène dans les convertisseurs Bessemer et les fours Martin. Les fours basiques (convertisseurs basiques) ont littéralement envahi le secteur de l'aciérie à la fin des années cinquante. L'insufflation d'oxygène, du seul fait de son importance économique, incita l'industrie des réfractaires à utiliser pour la première fois des matériaux synthétiques à grande échelle dans la fabrication de ses produits.

### Les réfractaires modernes

D'artisanat, la céramique est devenue une science appliquée. La Société américaine de céramique (American Ceramic Society) avait été fondée en 1899, et la Société britannique de céramique (British Ceramic Society) en 1901. On a commencé à parler des diagrammes de phase des oxydes dans les années vingt. Les techniques de la pétrographie étaient bien développées et les mécanismes de dégradation et d'usure des réfractaires commençaient à être mieux compris. Les producteurs américains de réfractaires, réorganisés et regroupés, étaient à même de financer leur propre recherche. Les outils de synthèse des réfractaires et les instruments d'investigation étaient en plein développement.

Les carbones synthétiques industriels n'étaient certes pas nouveaux. Le coke fut obtenu à partir de la houille dans les années mille huit cent soixante et, peu après, à partir du pétrole. Le graphite synthétique et le carbure de silicium firent leur apparition à peu près simultanément au début du siècle, à la suite de l'invention par Acheson, en 1896, du four électrique chauffé par autorésistance. Ces produits, aux propriétés fort différentes des oxydes, ont rapidement trouvé leurs propres usages et leurs marchés.

L'alumine synthétique,  $Al_2O_3$ , était disponible depuis que le procédé Bayer l'avait utilisée pour la production de l'aluminium vers 1888. La magnésite synthétique ( $MgO$ ) fut d'abord fabriquée à partir d'eau de mer au Royaume-Uni en 1937 et aux Etats-Unis en 1942, sous la pression des besoins en magnésium en temps de guerre. On trouvait aussi de la zirconite, également à cause des besoins militaires. La chaux a de tout temps été une matière

### Les propriétés des matériaux réfractaires

Les propriétés qui caractérisent les matériaux réfractaires de qualité dépendent de leur domaine d'application. L'aspect le plus important est leur «réfractarité», c'est-à-dire la température à laquelle l'échantillon commence à se ramollir (ou à fondre). Typiquement, les réfractaires n'ont pas un point de fusion spécifique; la transition de phase a lieu sur une échelle de températures lors d'un phénomène appelé «ramollissement», que l'on peut quantifier grâce à une résistance pyroscopique, qui est une pyramide s'infléchissant au cours du chauffage.

Une propriété connexe, et souvent plus utile, est la température de flexion sous charge. Les réfractaires fléchissent fréquemment sous une charge à des températures nettement inférieures à la température de résistance pyroscopique. Pour obtenir une valeur de ce paramètre, on place le réfractaire sous une charge connue puis on le chauffe. On note la température à laquelle commence à se produire un fléchissement ou une déformation générale. Cette valeur présente un grand intérêt, car elle sert à prévoir le comportement mécanique du réfractaire pendant son utilisation. La résistance à la charge est directement proportionnelle à la viscosité du verre présent.

Une autre caractéristique indispensable pour comprendre le comportement des réfractaires est leur stabilité dimensionnelle. Pendant leur utilisation industrielle, ces matériaux sont soumis à des cycles de chauffage/refroidissement qui les font se dilater ou se rétracter. Des variations importantes de dimensions entraînent une diminution de la stabilité et peuvent conduire, dans certains cas, à une défaillance de la structure elle-même.

Un autre phénomène connexe couramment observé est la thermoclaste, qui prend généralement la forme de fracturation, de fissuration ou d'écaillage du réfractaire, ce qui entraîne l'exposition de la masse interne du matériau. Elle résulte d'ordinaire des gradients de température à l'intérieur du matériau, de la compression de la structure soumise à des charges de grands volumes et des variations du coefficient de dilatation thermique dans la brique. Les industries du réfractaire essaient d'éviter la thermoclaste qui nuit à l'efficacité du réfractaire.

Les réfractaires ont de nombreuses applications industrielles, qui vont d'un large usage dans la sidérurgie et la métallurgie à un emploi limité en cimenterie et dans des ouvrages de collectivités du secteur public. Pratiquement, les réfractaires sont utilisés dans toutes les industries faisant appel aux hautes températures pour chauffer, sécher ou calciner des matériaux. Le tableau 84.4 montre la répartition de l'utilisation des réfractaires par secteur d'activité aux Etats-Unis.

Comme il ressort de ce tableau, l'industrie de l'acier est le secteur qui utilise plus de 50% des réfractaires produits aux Etats-Unis. C'est pourquoi les progrès réalisés par ces matériaux ont été stimulés dans une large mesure par les besoins de ce secteur d'activité.

première d'importance majeure. Beaucoup d'autres produits chimiques pouvaient être envisagés comme composants des réfractaires ou comme additifs ou liants mineurs. Le seul composant important des oxydes réfractaires qui ait résisté aux synthétiques est la silice ( $SiO_2$ ). Les roches et sables de silice à haute pureté abondent et sont utilisés dans l'industrie des réfractaires ainsi que dans la verrerie.

Si l'utilisation de produits synthétiques a constitué un avantage précieux pour l'industrie des réfractaires, les matières premières minérales n'ont aucunement perdu leur place. Les matériaux synthétiques coûtent plus cher et ce surcoût doit être justifié. Certains posent des problèmes sérieux au niveau de la fabrication

Tableau 84.4 • Utilisation des réfractaires par secteur d'activité aux États-Unis

Secteur d'activité	Pourcentage des ventes totales aux États-Unis
Fer et acier	51,6
Métaux non ferreux	7,5
Ciment	4,9
Verre	5,1
Céramique	9,7
Chimique et pétrolier	2,1
Entreprises du service public	0,9
Exportation	7,4
Autres non spécifiés	10,8

des réfractaires et il faut trouver les moyens de les résoudre. On a souvent obtenu des résultats optimaux en associant matières premières synthétiques et minérales dans un procédé original.

Des mélanges d'argile et de carbone étaient employés pour le garnissage des creusets et des poches de coulée à l'époque où la fonte était coulée; des briques de silice contenant du carbone étaient fabriquées en France dans les années mille huit cent soixante. Depuis 1960, aussi bien les techniques que les compositions ont profondément changé. L'utilisation d'oxydes réfractaires carburés s'est fortement développée, en commençant par MgO+C. L'élan initial a sans doute été donné par les convertisseurs basiques; aujourd'hui, il n'y a pratiquement plus de type de réfractaire à l'oxyde auquel on n'ait pas ajouté du carbone ou un précurseur du carbone afin d'en améliorer les performances dans des applications spécifiques.

Dès le début des années mille neuf cent, on fabriquait des particules ou des agglomérats réfractaires fondus à l'arc et, dans les années vingt et trente, des briques réfractaires coulées de compositions diverses — par exemple, mullite, alumine, magnésio-alumine-silice et alumine-zircone-silice. En règle générale, ces produits étaient entièrement fabriqués à partir de matières premières minérales.

Les réfractaires entièrement minéraux gardent aujourd'hui encore une place importante. Dans l'ensemble, ils sont moins chers et ont des propriétés remarquables qui permettent de les employer dans de nombreuses applications n'exigeant pas une réfractarité et une résistance à la corrosion maximales.

### L'industrie des réfractaires

Si beaucoup d'industries les emploient pour le garnissage intérieur des chaudières, fours et hauts-fourneaux en tous genres, la majeure partie des réfractaires est utilisée dans la métallurgie. En sidérurgie, un haut-fourneau ou un four à sole peuvent utiliser plusieurs types de réfractaires, à base de silice, de chrome ou de magnésite ou d'argile réfractaire.

Les industries ci-après les mettent en œuvre également, mais en moindre quantité: gaz, coke et sous-produits; centrales électriques; usines chimiques avec étuves et réchauds; industrie du ciment et de la chaux; céramique; verre; émaux et glaçures; fabrication de locomotives et de navires; réacteurs nucléaires; raffineries de pétrole; élimination des déchets (incinérateurs).

### Les procédés de fabrication

Le type de réfractaire utilisé dans une application donnée dépend des propriétés requises du procédé. Par exemple, si l'on recherche

une résistance à la corrosion par les gaz ou les liquides, il faut une faible porosité, une haute résistance physique et une résistance à l'abrasion. Les procédés demandant une faible conductivité thermique feront appel à des réfractaires totalement différents. En pratique, on associe généralement plusieurs réfractaires. Il n'existe pas de frontière bien définie entre matériaux réfractaires et matériaux non réfractaires, même si l'on a dit que, dans la pratique, la capacité de résister à des températures supérieures à 1 100 °C sans ramollissement était le critère permettant de parler de matériaux réfractaires industriels.

C'est en fonction des caractéristiques et performances d'un réfractaire dans une application particulière que l'on définit ses critères de fabrication. Il s'agit de choisir les matières premières ainsi que les méthodes et les paramètres du procédé de fabrication. Les exigences de la fabrication dépendent de la composition de la phase et de la microstructure — qui constituent le caractère du matériau — qui sont développées pendant la fabrication et sont responsables des propriétés et du comportement du produit.

### Les matières premières

Autrefois, les matières premières des réfractaires étaient choisies parmi divers gisements et extraites sélectivement, ce qui permettait d'avoir des matériaux possédant les propriétés désirées, et seul était nécessaire un enrichissement dans le cas de matières premières coûteuses, telles que la magnésite. Aujourd'hui, cependant, la demande de matières premières naturelles très pures ne cesse d'augmenter, de même que la demande de grains réfractaires préparés synthétiquement à partir de mélanges de matières premières de haute pureté et enrichies. Le matériau produit par la cuisson de minerais extraits des mines ou de mélanges synthétiques s'appelle le grain, le mâchefer ou la chamotte.

Les produits réfractaires sont généralement classés en quatre catégories: aluminosilicates, produits acides (silice), produits basiques et produits divers.

1. *Les réfractaires aluminosilicatés.* L'argile réfractaire est composée principalement de kaolinite [CAS 1318-74-7] ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), et contient de petites quantités d'autres minéraux argileux, de quartzite, d'oxyde de fer, de titane et des alcalis sous forme d'impuretés. L'argile peut être utilisée crue ou calcinée. Les argiles crues peuvent être broyées ou finement moulues pour être incorporées à un mélange réfractaire. Certains kaolins très purs sont transformés en coulis, criblés, séchés et placés dans un lieu ventilé pour leur donner une haute qualité uniforme. Les différents types d'argiles peuvent être mélangés, extrudés ou réduits en grains et calcinés pour produire la chamotte kaolinitique synthétique calcinée, ou la kaolinite crue grossièrement broyée peut être brûlée pour obtenir la chamotte. Après calcination ou brûlage, la kaolinite se décompose en mullite et verre de silice renfermant des impuretés des minerais présents dans le gisement (par exemple, quartzite, oxyde de fer, dioxyde de titane et alcalis). Elle est alors compactée à haute température en chamotte granulaire.
2. *Les réfractaires siliceux ou acides* utilisent principalement la silice sous forme de quartzite broyé et moulu (ganister) (92 à 98%), auquel on ajoute un liant comme la chaux (CaO). Les briques de silice subissent généralement une double cuisson, car elles se dilatent à la chaleur (les briques d'argile réfractaires se rétractent) et il est préférable de ne commencer à construire la paroi ou le garnissage d'un four qu'une fois la dilatation achevée.
3. *Les réfractaires basiques* utilisent la dolomie, la magnésite (MgO), l'oxyde de chrome, le fer et l'aluminium.
4. *Les autres réfractaires.* Parmi les très nombreux matériaux utilisés aujourd'hui, les plus courants sont les carbures comme le carbure de silicium, le graphite, l'alumine, l'oxyde de béryl-

lium (ou glucine), la thorine, l'oxyde d'uranium, l'amiante et l'oxyde de zirconium.

L'industrie a connu plusieurs révolutions. Parmi elles, la mécanisation permettant la manutention de solides en grande masse, le développement des capacités et de l'automatisation des procédés de fabrication ainsi que les techniques d'acquisition et d'analyse rapide de données sur le contrôle en cours de fabrication. Ces progrès ont transformé l'industrie des réfractaires.

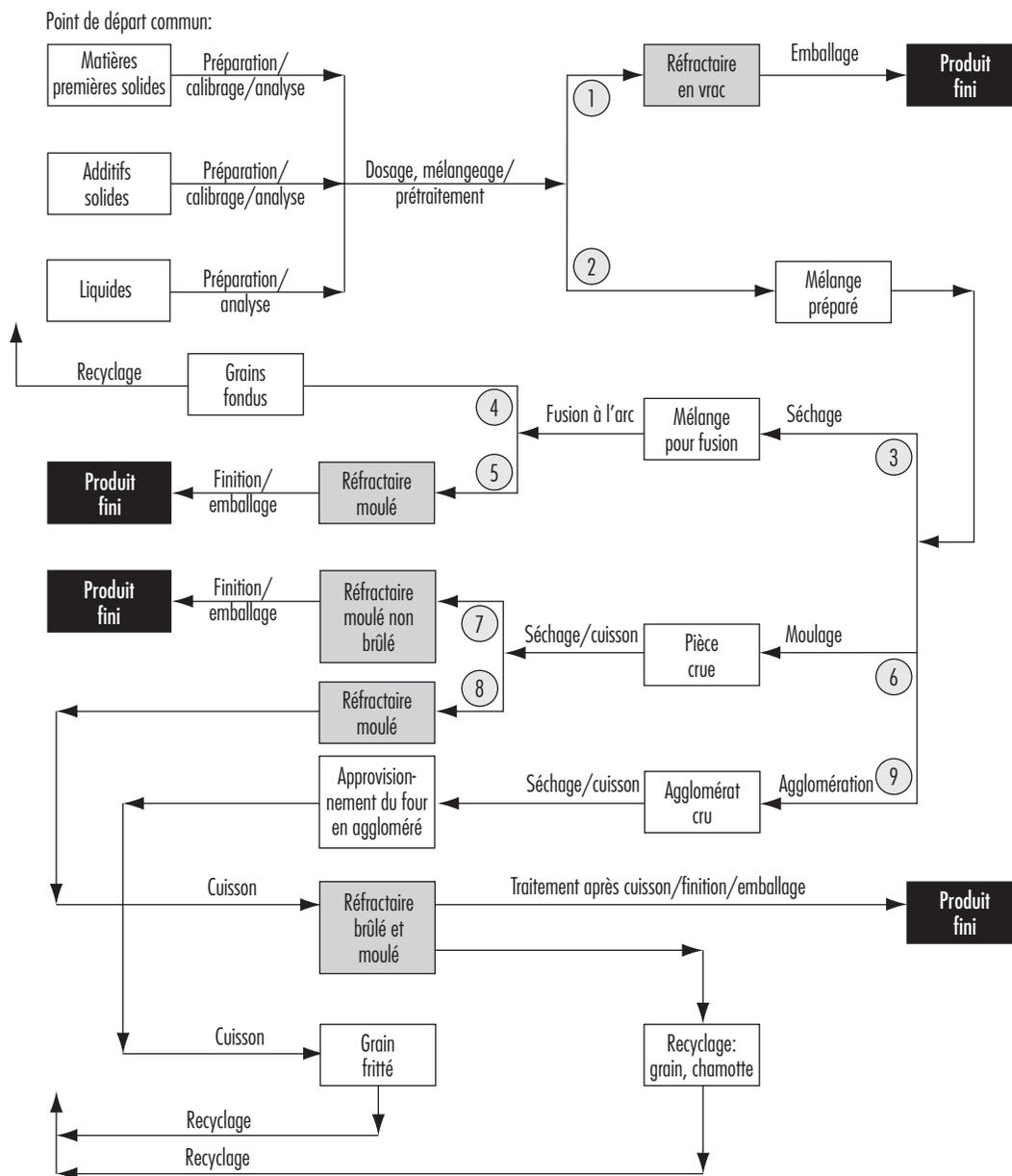
La figure 84.19 illustre les étapes de la fabrication de différents types de réfractaires. Elle a la forme d'un arbre de décision dont les branches sont numérotées à des fins d'identification. Il y a plusieurs chemins, aboutissant chacun à un type particulier de produit réfractaire.

Ces diagrammes génériques représentent en fait des milliers de procédés qui se distinguent, par exemple, par la liste des matières premières employées, le mode de préparation, la quantification et le dosage de ces dernières, la séquence ou encore le mode de mélangeage, etc. Il est possible d'omettre des étapes — par exemple, certains réfractaires non formés sont mélangés à sec et jamais mouillés jusqu'à leur mise en œuvre.

Les réfractaires ou produits peuvent être préformés (façonnés) ou formés et posés sur le site, mais en général, ils sont fournis sous les formes ci-après:

*Brique.* La brique réfractaire de dimension standard a 23 cm de long, 11,4 cm de large et 6,4 cm d'épaisseur (brique droite). Les briques peuvent être extrudées ou pressées à sec sur des presses

Figure 84.19 • Diagramme de fabrication des réfractaires



Source: Carniglia et Barria, 1992.

mécaniques ou hydrauliques. Les formes peuvent être cuites avant l'emploi ou liées par de la résine, un liant chimique ou du brai.

*Formes coulées par fusion.* Les composants réfractaires sont fondus à l'arc et coulés dans des moules (par exemple, les réservoirs de verre fondu peuvent atteindre  $0,33 \times 0,66 \times 1,33$  m). Après coulage et cuisson, les blocs sont meulés pour permettre un ajustage précis.

*Réfractaires coulés et moulés à la main.* Les grandes pièces, telles que blocs de brûleurs ou de flottaison ou les formes compliquées comme les parties d'un distributeur de verre, les cazettes, etc. sont produites par engobe ou moulage hydraulique de ciment ou par moulage à la main. Comme ces techniques requièrent beaucoup de main-d'œuvre, elles sont réservées aux objets qui ne peuvent être façonnés autrement.

*Réfractaires isolants.* Les réfractaires isolants sous forme de briques sont beaucoup plus légers que les briques traditionnelles de même composition en raison de leur porosité.

*Bétons réfractaires et mélanges pour gunitage.* Les bétons réfractaires sont formés de grains réfractaires auxquels on ajoute un liant hydraulique. Après addition d'eau, l'agent hydraulique réagit et lie le tout ensemble. Les mélanges pour gunitage sont conçus pour être pulvérisés sous pression d'eau et d'air à travers l'orifice du

pistolet. Le mélange peut être mouillé au préalable ou ajouté à l'eau au niveau de la busette.

*Réfractaires plastiques et mélanges à tasser.* Les réfractaires plastiques sont des mélanges de grains réfractaires et d'argiles plastiques ou de plastifiants avec de l'eau. Les mélanges à tasser peuvent ou non contenir de l'argile et ils sont généralement utilisés avec des moules. La quantité d'eau ajoutée avec ces produits varie, mais elle est maintenue au minimum.

### Les risques professionnels et les précautions

Le tableau 84.5 renseigne sur un grand nombre des risques rencontrés dans ce secteur industriel.

### Les problèmes de sécurité et de santé et les types de maladies

Cette partie donne une vue d'ensemble des problèmes documentés ou soupçonnés de sécurité et de santé de cette branche. Des recherches sur Internet (en 1997) n'ont pas permis de trouver des données internationales sur les accidents et les maladies. Les données recueillies par le ministère du Travail américain (US Department of Labor), de l'Administration de la sécurité et de la santé au travail (Occupational Safety and Health Administration (OSHA))

Tableau 84.5 • Risques potentiels pour la sécurité et la santé lors de la fabrication du verre, des céramiques et des matériaux connexes

Risques	Utilisations ou sources d'exposition au risque	Effets potentiels (risques physiques ou effets nocifs pour la santé)	Stratégies de prévention ou de contrôle
Risques de contrainte ergonomique; risques biomécaniques	Efforts excessifs lors de la manutention manuelle; postures de travail antiphiysiologiques; tâches comportant soulèvements, poussées ou tractions effectués très fréquemment ou sur une très longue durée	Foules, entorses, elongations, atteintes au dos et aux extrémités supérieures et inférieures Une fatigue physique et mentale excessive peut provoquer des erreurs entraînant des incidents secondaires	Evaluation des contraintes physiques lors des tâches considérées comme présentant des risques Conception et aménagement des tâches Utilisation de matériel de manutention adapté (appareils de levage, chariots automoteurs) Automatisation ou semi-automatisation des procédés Formation aux techniques et pratiques de sécurité
Risques physiques	Pincement ou choc dans ou contre des équipements fixes ou mobiles Glissades, trébuchements ou chutes sur des surfaces de circulation ou de travail, des tuyaux et autres appareils, outils ou matériel	Abrasions, coupures, contusions, lacérations, piqûres, fractures, amputations	Méthodes de travail sécuritaires Ordre et propreté Conception et aménagement des équipements Conception et aménagement des tâches Matériel de manutention adapté Surfaces antidérapantes
Bruit	Vibreurs pneumatiques, compresseurs, soupapes d'échappement, moteurs d'entraînement des mélangeurs, souffleries et collecteurs de poussières, convoyeurs, chariots automoteurs, procédés mécanisés et équipement pour l'emballage, etc.	Déficit auditif d'origine professionnelle, difficultés de communication et stress	Isolation, encoffrement, insonorisation, barrières réfléchissantes ou matériaux d'absorption acoustique Etude de dispositifs antibruit novateurs pour les machines bruyantes Utilisation systématique de moteurs ou de matériels moins bruyants (par exemple, vibreurs insonorisés) Installation de silencieux sur les outils pneumatiques Port de protecteurs de l'ouïe et programme de conservation de l'audition
Chaleur roynnante Températures élevées du milieu de travail	Procédés de chauffage ou de fusion pendant les travaux de maintenance ou les interventions d'urgence	Astreinte physiologique, contrainte et brûlures thermiques	Protection, écrans, barrières, surfaces réfléchissantes, isolation Systèmes refroidis à l'eau Salles de contrôle ou enceintes climatisées Vêtements et gants de protection contre la chaleur, sous-vêtements refroidis à l'eau Acclimatation au travail en ambiance chaude: absorption en quantité suffisante d'eau et de boissons renfermant des électrolytes, régimes travail-repos aménagés et autres pratiques de gestion proactive destinées à réduire la contrainte thermique

Tableau 84.5 • Risques potentiels pour la sécurité et la santé lors de la fabrication du verre, des céramiques et des matériaux connexes

Risques	Utilisations ou sources d'exposition au risque	Effets potentiels (risques physiques ou effets nocifs pour la santé)	Stratégies de prévention ou de contrôle
Inhalation de particules en suspension dans l'air provenant des matières premières, y compris silice cristalline, argile, chaux, oxyde de fer et autres poussières nocives	Manutention des matières premières et phases de production Exposition durant les activités routinières de maintenance, de démolition ou de réfection Les risques peuvent provenir d'un équipement non ventilé, d'une fuite, d'un joint non étanche sur les systèmes de transfert, goulottes ou matériels divers (convoyeurs, élévateurs, cribles, tamis, mélangeurs, broyeurs, trémies de stockage, soupapes, tuyauterie, fours de séchage ou de cuisson, opérations de moulage, etc.) Les matières premières sont extrêmement abrasives, causant l'usure des dispositifs de transfert ou de stockage lors de la phase de fabrication Le manque d'entretien des filtres à manches, épurateurs ou collecteurs de poussières et l'utilisation d'air comprimé pour le nettoyage augmentent le risque de surexposition Les procédés à très hautes températures comportent un risque d'exposition aux formes de silice les plus dangereuses (cristobalite ou tridymite)	Irritation (particules nocives), brûlures chimiques (chaux vive ou autres matières premières alcalines) ou encore effets chroniques tels que diminution de la fonction pulmonaire, pneumopathies, silicose et tuberculose	Ventilation avec extraction localisée ou sur les équipements avec filtres à manches, épurateurs ou autres collecteurs de poussières Bonne conception et maintenance de l'équipement de manutention, de fabrication, de transfert et de décharge Manipulation appropriée du matériel; mise en place de bonnes techniques de travail, de réduction et d'élimination des déchets Isolement des opérateurs dans des salles de contrôle ou des cabines pressurisées et automatisation des opérations de transfert pour diminuer le temps passé dans des zones empoussiérées Appareils de protection respiratoire, vêtements de protection, gants et autre équipement de protection individuelle Recherche et réparation des fuites; entretien anticipé et préventif de tout équipement comprenant des collecteurs de poussières et des soupapes Nettoyage régulier au moyen d'un aspirateur ou d'un système eau/vapeur Interdiction d'utiliser de l'air comprimé pour les nettoyages Dépistage, surveillance médicale régulière et intervention précoce en cas d'exposition
Lacérations, abrasions ou corps étrangers; contact avec des objets pointus, débris de verre, de poterie ou de céramique	Des projections de verre, de céramique ou d'autres fragments peuvent causer des plaies profondes ou des lésions oculaires graves Risque particulier d'explosion du verre renforcé en cours de fabrication Contact direct avec le verre ou d'autres fibres, notamment lors du formage, du bobinage ou de l'enduction des filaments continus Opérations d'étirage durant la fabrication des fibres optiques	Plaies ouvertes, lacérations ou abrasion de la peau et des tissus mous (tendons, ligaments, nerfs, muscles) et pénétrations de corps étrangers dans l'œil Risques de surinfection grave ou d'exposition de la peau à des substances corrosives ou toxiques	Port de gants résistant aux coupures Port de gants en toile ou en treillis métallique ou dans un autre matériau adapté à la manipulation du verre plat Mécanisation et automatisation réduisant les risques lors de la production du verre plat, mais les reportant sur les travailleurs chargés de la maintenance Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Premiers soins pour prévenir l'infection
Lacérations par des outils manuels	Les cutters, couteaux, râpes et outils tranchants sont fréquemment utilisés dans les zones de production, d'emballage et d'entreposage ou pendant les activités de maintenance	Coupures aux doigts, aux mains ou aux extrémités inférieures (jambes)	Couteaux à lames escamotables Remplacement des autres outils (cisailles ou ciseaux) Fourreaux de rangement Remplacement et aiguisage réguliers des lames Premiers soins pour prévenir l'infection
Particules ou fumées de métaux lourds (plomb, cadmium, chrome, arsenic, cuivre, nickel, cobalt, manganèse ou étain)	Matières premières ou impuretés dans les glaçures, formules de composition, pigments, agents colorants, films ou enduits Activités de maintenance et de construction comprenant le brasage, le coupage, le soudage à chaud, l'application ou le retrait des revêtements de protection Meulage, coupage, soudage, perçage ou moulage de pièces métalliques, de pièces ou machines faisant partie du procédé de fabrication (par exemple, blocs réfractaires ou alliages à haute température)	Toxicité des métaux	Moyens de prévention technique parmi lesquels ventilation avec extraction localisée et encoffrement des machines ou de l'équipement de production Outils électriques portables équipés d'un système d'aspiration avec filtration à haute efficacité (HEPA) Utilisation de cabines ventilées lors de la pulvérisation de peinture ou d'enduit Bonnes méthodes de travail pour réduire l'empoussièrment, par exemple grâce à des procédés par voie humide Ordre et propreté, systèmes d'aspiration avec filtration à haute efficacité (HEPA), nettoyage par voie humide et au jet d'eau Hygiène individuelle, lavage séparé des vêtements de travail contaminés Protection des voies respiratoires et vêtements de protection Surveillance médicale et biologique

Suite au verso.

Tableau 84.5 • Risques potentiels pour la sécurité et la santé lors de la fabrication du verre, des céramiques et des matériaux connexes

Risques	Utilisations ou sources d'exposition au risque	Effets potentiels (risques physiques ou effets nocifs pour la santé)	Stratégies de prévention ou de contrôle
Exposition au formaldéhyde par contact direct ou par inhalation	Composant des liants et apprêts dans l'industrie de la fibre de verre Expositions potentielles pendant le mélangeage des liants ou des apprêts et pendant la production	Irritation sensorielle et irritation des voies respiratoires Agent cancérigène probable	Ventilation générale avec extraction localisée Automatisation des opérations d'alimentation et de mélangeage Entretien des fours, cribles ou filtres et des systèmes de combustion Recherche active des fuites et programme de surveillance des fours de cuisson Ecran de protection pour le visage avec protection des yeux, gants et vêtements résistant aux produits chimiques Protection des voies respiratoires, selon les besoins
Bases (hydroxyde de sodium) ou acides (chlorhydrique, sulfurique, fluorhydrique)	Traitement et mesure du pH des eaux de fabrication, des eaux de chaudière ou des eaux usées Procédés de nettoyage à l'acide ou gravage à l'acide fluorhydrique	Corrosif pour la peau et les yeux Irritant des voies respiratoires et des muqueuses L'acide fluorhydrique cause de graves brûlures cutanées qui peuvent passer inaperçues pendant plusieurs heures après le contact avec l'acide	Isolement des procédés Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Utilisation des équipements de protection individuelle — protection de l'appareil respiratoire, gants en caoutchouc, protection du visage et des yeux, tablier en caoutchouc, vêtements de protection, douches oculaires et douches de sécurité Ventilation avec extraction des vapeurs acides ou des aérosols
Epoxydes, acrylates et uréthanes (pouvant contenir des solvants tels que le xylène, le toluène, etc.)	Ingrédients dans les résines, apprêts, liants et enduits utilisés lors de la fabrication Produits de maintenance	Sensibilisants potentiels de la peau et des voies respiratoires Certains époxydes contiennent de l'épichlorhydrine monomère soupçonnée d'être cancérigène Certains uréthanes contiennent du diisocyanate de toluène résiduel soupçonné d'être cancérigène Amines utilisées dans certains systèmes — irritantes ou corrosives Risque d'inflammabilité	Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Non-recours aux applications par pulvérisation (leur préférer les applications au rouleau ou au pinceau) Ventilation Tests de dépistage des travailleurs afin d'éviter d'exposer des personnes déjà sensibilisées à ces substances Utilisation des équipements de protection individuelle — gants étanches, longues manches, crèmes écran Stockage bien conçu
Styrène	Résines de polyester contenant du styrène; ingrédients de l'apprêt	Irritant des yeux, de la peau, des voies respiratoires; effet sur le système nerveux central et organes cibles Cancérigène possible Risque d'inflammabilité	Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Non-recours aux applications par pulvérisation (leur préférer les applications au rouleau ou au pinceau) Ventilation Utilisation des équipements de protection individuelle — gants résistant aux produits chimiques, longues manches, crèmes écran Appareils de protection respiratoire dans certains cas
Silanes	Promoteurs d'adhérence ajoutés aux apprêts, liants ou enduits Peuvent s'hydrolyser et libérer de l'éthanol, du méthanol, du butanol ou d'autres alcools	Irritant des yeux, de la peau, de l'appareil respiratoire Effets possibles sur le système nerveux central Les éclaboussures dans les yeux peuvent causer des dommages irréversibles Risque d'inflammabilité	Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Utilisation des équipements de protection individuelle — gants et protection des yeux Ventilation
Latex	Zones de préparation des apprêts, des liants ou des enduits; certains produits de maintenance	Irritant pour la peau et les yeux Peut contenir du formaldéhyde ou d'autres biocides ou solvants	Utilisation des équipements de protection individuelle — gants et protection des yeux Appareils de protection respiratoire dans certains cas
Catalyseurs et accélérateurs	Ajoutés aux résines ou aux liants lors de la cuisson ou pour certains produits de maintenance	Irritants ou corrosifs pour la peau ou les yeux Certains sont très réactifs et sensibles à la température	Adoption de techniques de manipulation sécuritaires Utilisation des équipements de protection individuelle — gants et protection des yeux Stockage approprié (surveiller la température et veiller à entreposer séparément les produits incompatibles)

Tableau 84.5 • Risques potentiels pour la sécurité et la santé lors de la fabrication du verre, des céramiques et des matériaux connexes

Risques	Utilisations ou sources d'exposition au risque	Effets potentiels (risques physiques ou effets nocifs pour la santé)	Stratégies de prévention ou de contrôle
Solvants hydrocarbonés ou chlorés	Ateliers de maintenance et opérations de nettoyage des pièces	Effets divers: dermatite d'origine chimique, effets sur le système nerveux central Les solvants non chlorés peuvent être inflammables Les solvants chlorés peuvent se décomposer s'ils sont brûlés ou chauffés	Remplacement par des agents de nettoyage moins dangereux (détergents à base d'eau) Remplacement des méthodes de nettoyage — nettoyage à haute pression, enduits pelables, etc. Ventilation des postes de lavage Utilisation des équipements de protection individuelle — gants, protection des yeux, du visage, au besoin appareil de protection respiratoire
Propane, gaz naturel, essence, mazout	Combustibles pour la production de chaleur industrielle Carburants pour les chariots automoteurs	Risques d'incendie et d'explosion Exposition au monoxyde de carbone ou à d'autres produits de combustion incomplète	Bonne conception et inspection du système de stockage et de distribution, et contrôle des procédés de combustion Etude des dangers des procédés et vérification périodique de leur bon fonctionnement Adoption de techniques sécuritaires de déchargement, de remplissage et de manipulation Procédures de travail en ambiance chaude Vérification régulière et contrôle des procédés de combustion et des dispositifs d'échappement
Inhalation de bioaérosols	Aérosols contenant des bactéries, des moisissures ou des champignons provenant des opérations de pulvérisation d'eau, des tours de refroidissement, des systèmes de ventilation, des opérations de nettoyage par voie humide	Maladie due à l'eau contaminée avec symptômes pseudogrippaux généralisés non spécifiques, fatigue Risque de dermatite	Conception du procédé et réduction des brouillards Traitement des eaux de fabrication et de refroidissement avec des biocides Nettoyage et désinfection à intervalles réguliers Élimination ou réduction des sources de contamination du circuit d'eau Protection des voies respiratoires Vêtements de protection, gants et hygiène individuelle
Fibres de verre, de laine minérale, fibres céramiques réfractaires	Dans les procédés de fabrication incluant la production de fibres, le coupage ou la mise en cubes, le bobinage et l'emballage Lors de l'utilisation de matériaux fibreux, dans les composants des fours, les conduits et les installations en général	Les fibres non respirables peuvent provoquer une irritation mécanique des yeux et de la peau Les fibres respirables peuvent irriter les yeux, la peau et les voies respiratoires Les fibres biopersistantes sont à l'origine de fibrose et de cancers dans les études faites sur des animaux	Ventilation générale avec extraction localisée sur les équipements Méthodes de coupage Bonnes habitudes de nettoyage (aspiration plutôt que nettoyage à l'air comprimé) Vêtements de protection individuelle (longues manches) et lavages fréquents Hygiène individuelle Appareils de protection respiratoire si nécessaire Pratiques de démolition et de dépose des matériaux, dont le mouillage pour les opérations ultérieures

et par le Bureau des statistiques du travail (Bureau of Labor Statistics (BLS)) ont servi à identifier les risques sur le lieu de travail et à décrire les caractéristiques des accidents et des maladies. Ces données devraient être représentatives de la situation dans le monde.

#### Les risques identifiés durant les inspections

Les inspections qui ont lieu régulièrement dans les entreprises fabriquant des produits en pierre, argile, verre et ciment (code 32 de l'International Standard Industrial Classification (ISIC)) correspondant au code 36 de la Classification internationale type, par industrie, de toutes les branches d'activité économique (CITI) révèlent des risques communs dans ce secteur. Le dépouillement des mises en demeure délivrées par l'OSHA pour non-application du règlement permet de regrouper les problèmes de sécurité et de santé comme suit:

- *Communication de renseignements relatifs aux matières dangereuses* mises en œuvre sur le lieu de travail pouvant se traduire par des risques physiques ou des effets sur la santé.
- *Maîtrise des énergies dangereuses* — Procédures de verrouillage-déverrouillage pour contrôler les activités autour des machines ou de l'équipement susceptibles de produire de façon imprévue un excès d'énergie imprévu, ou de libérer de l'énergie et d'être à l'origine de blessures. Entrent dans cette catégorie: les énergies électrique, mécanique, hydraulique, pneumatique, chimique, le rayonnement thermique, etc.
- *Sécurité électrique*, y compris l'équipement électrique ou la conception des circuits, les méthodes de câblage, les méthodes de travail sûres et la formation.
- *Autorisation d'accès aux espaces confinés* — Identification et évaluation de ce type d'espace et procédure d'accès sûre.
- *Équipement de protection individuelle* — Évaluation, sélection et utilisation de protections pour les yeux, le visage, les mains, les pieds et la tête.
- *Protection des machines, appareils et outils* pour prémunir les opérateurs et les travailleurs se trouvant à proximité contre les dangers potentiels: commande de mise en route et point d'étranglement, pièces en rotation, éclats ou étincelles, y com-

Figure 84.20 • Les protecteurs installés sur les machines prémunissent les opérateurs contre le contact avec des arbres en rotation, des courroies en mouvement et des chaînes d'entraînement



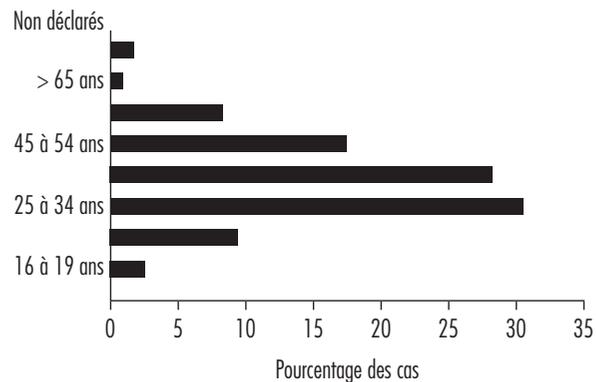
pris machines et appareils fixes, portables, outils électriques portables et réglage des protections et des supports sur les machines à roue abrasive (meuleuses) (voir figure 84.20).

- *Protection des voies respiratoires* — Sélection, utilisation, entretien, formation à l'utilisation, examen médical d'aptitude au port et vérification de la bonne étanchéité des appareils.

Figure 84.21 • Les zones de travail et de circulation ne doivent pas être encombrées, ni les sols glissants pour exclure le risque de chute



Figure 84.22 • Pourcentage de maladies et d'accidents avec arrêt de travail par âge, Etats-Unis, code ISIC 32, 1994



- *Exposition au bruit d'origine professionnelle* — Limitation de l'exposition par des moyens de prévention technique et des mesures organisationnelles ou de protection de l'ouïe, et mise en œuvre de programmes de conservation de l'audition.
- *Prévention des incendies et préparation des moyens et capacités d'intervention en cas d'urgence*, y compris extincteurs, issues de secours, marche à suivre, stockage et utilisation appropriés des matériaux inflammables/combustibles.
- *Zones de travail et de circulation*, y compris dispositifs de protection au niveau des sols, des ouvertures et des trous dans les murs; ordre et propreté; élimination des risques de glissade, trébuchement ou chute dans les allées et les lieux de passage (voir figure 84.21).
- *Chariots de manutention automoteurs* — Prescriptions de sécurité applicables notamment à la conception, à l'entretien et à l'utilisation des chariots élévateurs à fourche, chariots à plate-forme, tracteurs, transpalettes électriques et autres chariots de manutention spéciaux et équipés de moteurs électriques ou à combustion interne.
- *Echelles, escaliers et échafaudages fixes ou portables* — Conception, inspection ou entretien et utilisation sûre.
- *Protection contre les chutes* — Utilisation d'équipement antichute lors de travaux en hauteur.
- *Activités de coupage et de soudage* — Utilisation sûre du matériel de coupage et de soudage à l'oxygène/acétylène, au chalumeau ou à l'arc et procédures connexes.
- *Équipement de manutention*, y compris ponts roulants et portiques, palans, chaînes et élingues.
- *Lutte contre l'exposition aux substances toxiques ou dangereuses*, y compris aux contaminants de l'air ou aux produits chimiques spécifiquement réglementés (par exemple, silice, plomb, amiante, formaldéhyde, cadmium ou arsenic).

### Les types d'accidents du travail et de maladies professionnelles

#### Les taux d'incidence des accidents et des maladies

Selon les données du ministère du Travail américain, les fabricants de produits en pierre, argile et verre (code ISIC 32) ont un taux d'incidence de maladies à déclaration obligatoire ou d'accidents non mortels de 13,2 cas par 100 travailleurs à temps plein et par an. Ce taux est plus élevé que celui de l'ensemble des industries manufacturières (12,2) et de toute l'industrie privée (8,4). Environ 51% des accidents entraînant des lésions et étant

Tableau 84.6 • Taux d'incidence<sup>1</sup> des accidents du travail et des maladies professionnelles non mortels pour 100 travailleurs à temps plein dans les entreprises américaines, code ISIC 32, secteur privé et industries manufacturières, 1994

Industrie	Code ISIC <sup>2</sup>	Emploi annuel moyen en 1994 <sup>3</sup> (en milliers)	Accidents et maladies		Accidents			Accidents		
			Total	Avec arrêt de travail	Total <sup>4</sup>	Avec arrêt de travail	Sans arrêt de travail	Total	Avec arrêt de travail	Sans arrêt de travail
Secteur privé, total		95 449,3	8,4	3,8	2,8	4,6	7,7	3,5	2,6	4,2
Industries manufacturières, total		18 303,0	12,2	5,5	3,2	6,8	10,4	4,7	2,9	5,7
Roche, argile et verre	32	532,5	13,2	6,5	4,3	6,7	12,3	6,1	4,1	6,2
Verre plat	321	15,0	21,3	6,6	3,1	14,7	17,3	5,2	2,6	12,1
Verre et verrerie, pressé ou soufflé	322	76,8	12,5	6,0	3,0	6,5	11,3	5,5	2,8	5,8
Récipients en verre	3 221	33,1	14,1	6,9	3,4	7,2	13,2	6,5	3,2	6,7
Verre pressé et soufflé, nca	3 229	43,7	11,3	5,4	2,8	5,9	9,8	4,8	2,4	5,1
Produits en verre commercial	323	60,7	14,1	6,1	3,1	8,0	12,7	5,4	2,9	7,4
Produits en argile (pour la construction)	325	32,4	14,1	7,7	4,2	6,5	13,1	7,2	4,0	5,9
Briques et carreaux en argile (pour la construction)	3251	—	15,5	8,4	5,1	7,1	14,8	7,9	5,0	6,9
Produits réfractaires en argile	3255	—	16,0	9,3	4,7	6,8	15,6	9,3	4,7	6,4
Céramiques et produits apparentés	326	40,8	13,6	6,8	3,8	6,8	12,2	6,1	3,5	6,1
Articles et accessoires de plomberie vitrifiés	3261	—	17,8	10,0	3,8	7,8	16,1	9,0	3,5	7,1
Porcelaine vitrifiée de table et de cuisine	3262	—	12,8	6,3	4,4	6,5	11,0	5,6	3,8	5,5
Éléments en porcelaine (pour appareils électriques)	3264	—	11,3	5,8	3,7	5,6	9,8	5,0	3,4	4,8
Produits de poterie, nca	3269	—	12,6	5,6	3,7	7,1	11,6	5,0	3,5	6,6
Produits en ciment, gypse et plâtre	327	198,3	13,4	7,0	5,6	6,4	13,0	6,9	5,5	6,2
Parpaings et briques en béton	3271	17,1	14,5	7,8	6,8	6,8	14,0	7,7	6,7	6,2
Produits en béton, nca	3272	65,6	17,7	9,8	7,0	7,9	17,1	9,5	6,8	7,6
Béton prêt à l'emploi	3273	98,8	11,6	6,0	5,3	5,6	11,5	6,0	5,3	5,5
Divers produits minéraux non métalliques	329	76,7	10,7	5,4	3,3	5,3	9,8	5,0	3,2	4,9
Abrasifs	3291	20,0	10,2	3,9	2,5	6,3	9,5	3,7	2,4	5,8
Laine minérale	3296	23,4	11,0	6,1	3,0	4,9	10,0	5,6	2,7	4,3
Réfractaires non argileux	3297	—	10,6	5,8	4,5	4,8	10,2	5,7	4,3	4,6
Produits minéraux non métalliques, nca	3299	—	13,1	8,2	5,8	4,9	11,4	7,0	5,5	4,3

nca = non classé ailleurs. — = donnée non disponible.

<sup>1</sup> Les taux d'incidence représentent le nombre d'accidents et de maladies par 100 travailleurs à temps plein; ils ont été calculés en prenant le nombre d'accidents et de maladies, en le divisant par le nombre d'heures ouvrées par tous les travailleurs pendant l'année en cours et en multipliant le résultat obtenu par 200 000 (équivalent de base en nombre d'heures ouvrées par 100 travailleurs travaillant 40 heures par semaine pendant 52 semaines par an). <sup>2</sup> *Standard Industrial Classification Manual*, édition de 1987. <sup>3</sup> L'emploi est exprimé comme une moyenne annuelle et a été calculé à partir des données du Programme de statistiques sur l'emploi du Bureau américain des statistiques du travail (BLS State Current Employment Statistics Programme). <sup>4</sup> Le total des cas inclut ceux où le travailleur est seulement capable d'exécuter un travail plus léger, en plus des jours de travail perdus intégralement avec ou sans activité réduite. <sup>5</sup> Les journées de travail perdues comprennent les jours où le travailleur n'effectue pas son travail, que ce travail soit réduit ou non.

Source: d'après une enquête nationale sur les accidents du travail et les maladies professionnelles dans l'industrie privée, réalisée par le ministère du Travail américain, Bureau des statistiques du travail (Department of Labor, Bureau of Labor Statistics).

### Les gemmes synthétiques

Les gemmes synthétiques ont une structure et une composition chimique identiques à celles des pierres précieuses naturelles. Les gemmes d'imitation, en revanche, sont des pierres simplement destinées à simuler l'apparence d'une pierre naturelle particulière. Quelques procédés de base permettent d'en produire plusieurs variétés. Au nombre des gemmes synthétiques figurent le grenat, le spinelle, l'émeraude, le saphir et le diamant. La plupart de ces pierres sont destinées à être utilisées en joaillerie. On emploie les diamants comme abrasifs, et les rubis et les grenats dans les lasers.

La première pierre synthétique employée en joaillerie fut l'émeraude. La technique de fabrication fait l'objet d'une marque déposée et reste secrète, mais elle utilise, selon toute vraisemblance, le procédé par dissolution dans un fondant qui consiste à fondre ensemble des silicates d'alumine et de béryllium, additionnés de chrome pour la couleur. Sortant du fondant, l'émeraude se cristallise. L'obtention de pierres par ce procédé peut demander un an.

On emploie le procédé de synthèse par fusion de flamme dit procédé Verneuil, pour obtenir des saphirs et des rubis. Ce procédé nécessite de grandes quantités d'hydrogène et d'oxygène et consomme donc beaucoup d'énergie. Il consiste à chauffer un germe cristallin à l'aide d'un chalumeau oxyhydrique jusqu'à ce que la surface se liquéfie. On ajoute avec précaution une matière première en poudre telle que de la poudre d'alumine ( $Al_2O_3$ ) pour le saphir. Lorsque la matière première commence à fondre, on retire progressivement le germe cristallin de la flamme, de sorte que le liquide qui en est le plus éloigné se solidifie. L'extrémité proche de la flamme, encore liquide, est prête à recevoir davantage de matière première. On recueille finalement un cristal en forme de bouteille renversée. La variété des couleurs s'obtient par addition de petites quantités de divers ions métalliques aux matières premières. Pour le rubis, on remplace 0,1% des ions aluminium par des atomes de chrome.

Le spinelle ( $MgAl_2O_4$ ), en tant que gemme synthétique incolore, est fabriqué au moyen du procédé Verneuil. Tout comme le saphir, on l'utilise dans l'industrie dans une gamme étendue de couleurs pour les pierres de naissance et, en Amérique du Nord, pour les bagues d'étudiants. Les mêmes ions métalliques, ajoutés au saphir et au spinelle, donneront des couleurs différentes.

Les diamants synthétiques sont utilisés dans l'industrie en raison de leur dureté pour couper, polir, meuler et forer et, notamment, pour découper et meuler le granit employé dans la construction, forer des puits et meuler des alliages non ferreux. Par ailleurs, des procédés sont à l'étude pour déposer du diamant sur des surfaces afin de les rendre claires, dures et résistantes aux rayures.

Les diamants se forment lorsque du carbone élémentaire ou du graphite est soumis à une pression et à des températures élevées pendant une certaine durée. Pour fabriquer un diamant synthétique, il faut mélanger le graphite et des catalyseurs métalliques et les soumettre à une forte pression et à des températures pouvant aller jusqu'à 1 500 °C. La dimension et la qualité du diamant sont fonction du temps, de la pression ou de la température. Pour obtenir les hautes pressions nécessaires à la formation des diamants en un temps raisonnable, on utilise des enceintes en carbure de tungstène en forme d'anneau qui mesurent jusqu'à 2 m de large et 20 cm d'épaisseur. Le mélange graphite-catalyseur est placé dans une capsule en céramique et des pistons coniques le compriment par le bas et par le haut. Après un temps déterminé, la capsule est retirée de la presse. On la brise et on soumet le graphite contenant le diamant à une série d'agents destinés à éliminer tous les composants autres que le diamant. Ces produits, très puissants, sont des sources potentielles de brûlures et de lésions de l'appareil respiratoire. Les diamants de qualité joaillerie peuvent être produits de la même manière, mais la durée de pression requise rend ce procédé trop coûteux.

Les risques pour la santé liés à la fabrication des diamants synthétiques comprennent l'exposition potentielle à des acides très réactifs et à des agents caustiques en grande quantité, au bruit, aux poussières résultant de la fabrication et de la destruction des capsules en céramique et aux poussières métalliques. Le bris des enceintes de carbure est également cause de risques potentiels. Au terme d'un nombre variable d'utilisations, les enceintes cèdent et peuvent être à l'origine de blessures si elles ne sont pas bien isolées. Des troubles de nature ergonomique apparaissent chez les travailleurs chargés des opérations de tri et de calibrage des diamants dont les petites dimensions rendent ces tâches répétitives et fastidieuses.

**Basil Dolphin**

soumis à déclaration dans le secteur de la production d'articles en pierre, en argile et en verre ne donnent pas lieu à des arrêts de travail.

Le ministère du Travail américain fournit également les taux d'incidence des «cas entraînant une absence au travail» par 100 travailleurs à temps plein, sur la base du nombre de maladies ou d'accidents invalidants ayant entraîné une absence au travail. Le taux d'incidence global des jours de travail perdus comprend les jours où le travailleur n'est pas capable d'effectuer complètement son travail qui est alors réduit ou allégé. Il est dans ce secteur de 6,5 pour 100 travailleurs et par an. Ce taux est supérieur à celui de l'ensemble des industries manufacturières (5,5) et de l'industrie privée (3,8). Dans environ 93% des cas, les journées de travail perdues dans ce secteur résultent d'accidents plutôt que de maladies professionnelles.

Le tableau 84.6 donne des chiffres plus détaillés sur le taux d'incidence des accidents du travail et des maladies professionnelles, tous deux confondus, d'une part, et des accidents considérés séparément, d'autre part, pour différents types de procédés de fabrication de produits à base de roche, d'argile et de verre (code ISIC 32). Les valeurs indiquées pour les taux d'incidence et les caractéristiques démographiques de l'échantillon pourraient ne pas être représentatives de la situation dans le monde, mais n'en

constituent pas moins les données les plus complètes dont on dispose.

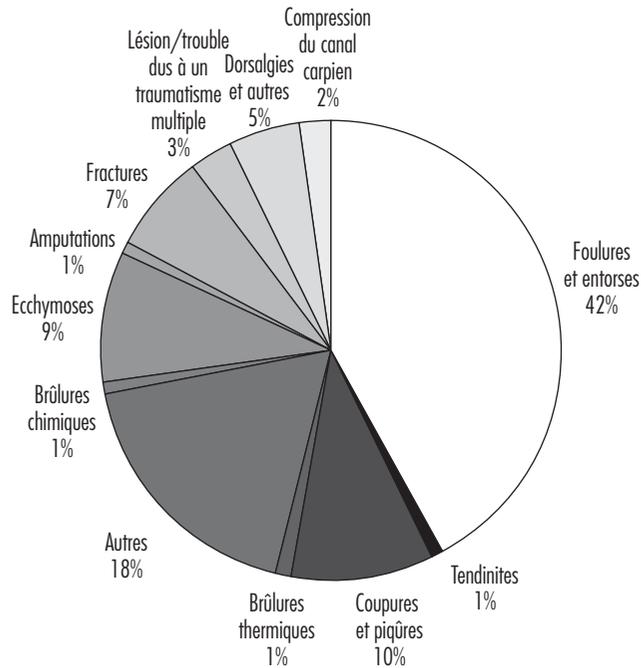
#### **Les caractéristiques démographiques des accidents du travail et des maladies professionnelles**

Les travailleurs âgés de 25 à 44 ans représentaient environ 59% des 23 203 cas d'absence pour cause d'accident ou de maladie dans ce secteur aux États-Unis. Venait ensuite la tranche d'âge des 45-54 ans, avec 18% des cas (voir figure 84.22).

Dans environ 85% des cas, il s'agissait d'hommes. Dans 24% des cas (hommes et femmes), les travailleurs avaient moins d'un an d'ancienneté. Ceux qui avaient entre 1 et 5 ans d'ancienneté représentaient 32% des cas, ceux ayant plus de 5 ans d'ancienneté 35%.

*Nature.* L'analyse de la répartition des types d'absences pour cause d'accident ou de maladie aide à expliquer les facteurs qui interviennent. Foulures et entorses arrivent en tête, représentant 42% de l'ensemble des cas (voir figure 84.23). Au second rang viennent les coupures et les piqûres (10%), suivies par les ecchymoses (9%), les fractures (7%) et les dorsalgies ou autres douleurs (5%). Les brûlures thermiques, chimiques et les amputations sont plus rares (1% ou moins).

Figure 84.23 • Nature des accidents du travail et des maladies professionnelles ayant entraîné un arrêt de travail, Etats-Unis, code ISIC 32, 1994



Causes ou cas d'accidents. La figure 84.24 montre qu'un effort excessif dû au soulèvement de charges vient au premier rang des causes provoquant une lésion invalidante. Il est à l'origine de 17%

Figure 84.24 • Causes ou cas d'accidents du travail et de maladies professionnelles ayant entraîné un arrêt de travail, Etats-Unis, code ISIC 32, 1995

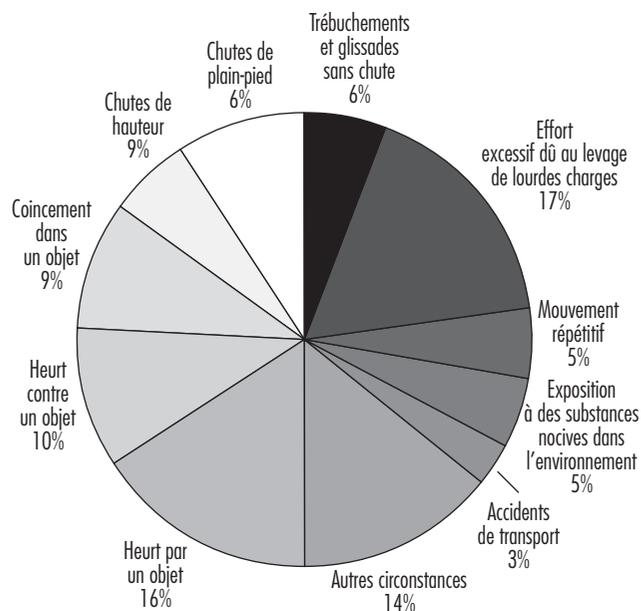
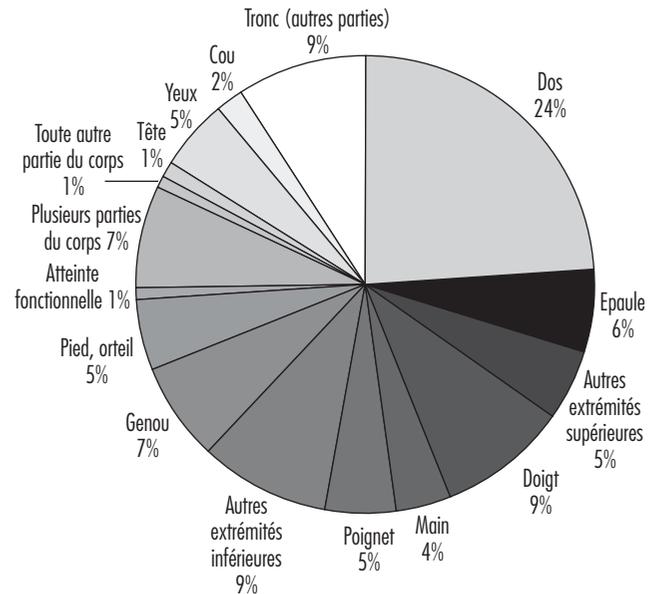
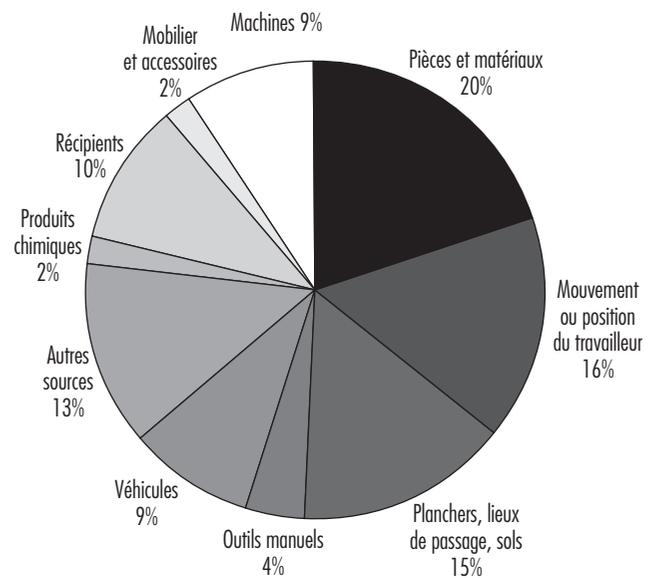


Figure 84.25 • Partie du corps atteinte lors d'accidents du travail ou de maladies professionnelles ayant entraîné un arrêt de travail, Etats-Unis, code ISIC 32, 1994



environ des cas d'incapacité de travail auxquels il faut ajouter 5% d'autres cas d'incapacité dus à des gestes répétés. La deuxième cause d'accident la plus fréquente est celle où le travailleur est heurté par un objet puisqu'elle représente 16% des cas d'accident, suivie par le scénario dans lequel c'est le travailleur qui heurte un objet (10% des cas). Autres causes fréquentes d'accidents: coincide-

Figure 84.26 • Sources d'accidents du travail et de maladies professionnelles ayant entraîné un arrêt de travail, Etats-Unis, code ISIC 32, 1994



84. LE VERRE, LES CÉRAMIQUES ET LES MATÉRIAUX CONNEXES

Figure 84.27 • Les aérosols des eaux recyclées non traitées peuvent causer des maladies par contamination de l'eau



Owens Corning

ment dans un objet (9%), chutes de hauteur (9%), chutes de plain-pied (6%) et glissades ou trébuchements sans chute (6%), l'exposition à des substances ou à un environnement dangereux n'intervenant que dans 5% des cas.

*Sièges des lésions.* La partie du corps le plus souvent atteinte est le dos (24% des cas) (voir figure 84.25), les lésions aux extrémités supérieures (doigt, main, poignet et bras confondus) représentant 23% des cas, dont 9% pour les doigts seuls. On retrouve la même proportion pour les extrémités inférieures (21%), le genou étant touché dans 7% des cas.

*Sources.* Citons, parmi les sources les plus fréquentes à l'origine d'accidents et de maladies: pièces et matériaux (20%); mouvement ou position du travailleur (16%); voies de circulation ou sols (15%); récipients (10%); machines (9%); véhicules (9%); outils manuels (4%); mobilier et accessoires (2%); produits chimiques (2%) (voir figure 84.26).

#### **La prévention et la lutte contre la maladie**

Les traumatismes cumulatifs liés à des mouvements répétés, au surmenage et à des efforts excessifs sont fréquents dans ce secteur d'activité. Dans certains cas, des robots ont pris le relais, mais la manutention manuelle demeure encore très courante. Le bruit est un problème important lui aussi: les compresseurs, souffleries, centrifugeuses, vibreurs pneumatiques et équipements de conditionnement peuvent avoir des niveaux sonores atteignant de 90 à 95 dBA. Des protecteurs antibruit et un programme de protection de l'ouïe préviendront toute perte irréversible d'audition.

Cette industrie utilise de grandes quantités de silice cristalline. Il faut limiter les expositions lors de la manipulation, de l'entretien

et du nettoyage. Un bon entretien des locaux à l'aide d'un système d'aspiration ou de nettoyage à l'eau réduit les risques d'exposition. Les travailleurs doivent se soumettre périodiquement à des examens de dépistage (épreuve fonctionnelle respiratoire, radiographie des poumons) en cas d'exposition prolongée. Il faudrait aussi limiter le plus possible l'exposition aux métaux lourds présents dans les matières premières, les glaçures ou les pigments. L'utilisation de substituts des métaux lourds pour les glaçures éliminera également la contamination de la nourriture et des boissons et les maladies qu'elle entraîne. En résumé, un entretien soigneux des locaux et le port d'un équipement de protection respiratoire permettent d'éviter les effets nocifs. Une surveillance médicale, comprenant une surveillance biologique, peut se révéler nécessaire.

Il est courant, dans la fabrication de fibres de verre, d'utiliser des liants contenant du formaldéhyde, des résines époxydes et des silanes. Il faut donc prendre des mesures pour prévenir les irritations de la peau et des voies respiratoires. Le formaldéhyde est classé comme agent cancérigène dans de nombreux pays et, de ce fait, son utilisation est réglementée. Des fibres respirables sont libérées au cours des différentes étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des produits en fibres de verre, de roche, de laitier et en fibres céramiques réfractaires. Bien que l'exposition aux fibres en suspension dans l'air ait généralement été assez faible (moins de 1 fibre par centimètre cube) pour la plupart des matériaux, les applications par projection/soufflage la rendent souvent beaucoup plus élevée.

La roche, le laitier et le verre font partie des matériaux d'isolation industrielle actuellement en usage qui ont été les plus étudiés. Des épidémiologistes ont montré que le tabagisme avait un impact sensible sur la mortalité par cancer du poumon chez les travailleurs de cette industrie. Des études transversales sérieuses n'ont pas conclu à un excès de morbidité ou de mortalité dû aux fibres dans les pathologies pulmonaires. Des études de toxicité chronique effectuées sur des rats inhalant des fibres ont montré que la durée de vie des fibres vitreuses était un facteur déterminant de leur nocivité. Cette durée de vie ou biopersistance dépend de leur composition qui peut être très variable. Afin d'éviter des problèmes de santé publique, un comité technique de la Commission européenne a proposé d'examiner la biopersistance des fibres vitreuses grâce à des tests d'inhalation de courte durée. Une laine isolante dont la composition a fait l'objet de tests approfondis à la dose maximale tolérée par les rats en inhalation chronique et qui ne provoque pas de maladie irréversible est alors proposée comme fibre de référence.

#### **Les questions d'environnement et de santé publique**

Les particules sont les principaux polluants atmosphériques émis lors de la fabrication du verre, des céramiques, de la poterie et des briques. La meilleure technologie possible de lutte contre ces particules consiste à utiliser des filtres à manches et des condenseurs électrostatiques humides pour réduire les émissions. Les polluants atmosphériques dangereux produits lors du mélangeage avec le liant, l'application d'enduit et les procédés de cuisson font l'objet d'études approfondies. Ces substances comprennent: le styrène, les silanes, les résines époxy utilisées dans la fabrication des filaments de verre continus ainsi que le formaldéhyde, le méthanol et le phénol employés pour la production de la laine de roche, de laitier et de verre. Le formaldéhyde est le polluant qui influe de façon déterminante sur les normes de l'industrie. Les polluants provenant des métaux lourds comme le chrome influent sur les normes applicables aux fours de fusion du verre, tandis que les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) continuent de poser des problèmes dans certains pays. Les émissions de fluorure et de bore sont préoccupantes dans la production de filaments de verre continus. Le bore pourrait aussi devenir un défi

pour l'environnement si certains pays avaient besoin de fibres de laine de verre vitreuses hautement solubles.

Étant donné le volume d'air à évacuer et la nature du façonnage et de la fusion du verre, cette industrie rejette de grandes quantités d'eau par évaporation. De nombreux établissements, comme aux États-Unis, ne rejettent pas d'eaux usées. Ces eaux usées sont recyclées, mais elles contiennent parfois des matières organiques qui peuvent être à l'origine de risques biologiques sur le lieu de travail si elles ne sont pas traitées pour arrêter la prolifération des micro-organismes (voir figure 84.27). Les déchets générés par ce genre d'industrie comprennent des métaux lourds,

des produits corrosifs, des liants et des solvants usés. Avec l'industrie de la fibre de verre, le recyclage des bouteilles et du verre plat a trouvé un débouché important. C'est ainsi que les produits actuels en laine de verre contiennent entre 30 et 60% de verre recyclé. Les réfractaires usés sont également récupérés et réutilisés avec profit.

Remerciements: les auteurs tiennent à remercier Dan Dimas, CSP, Libbey-Owens-Ford, pour les photographies, et Michel Soubeyrand, Libbey-Owens-Ford, pour ses informations concernant le dépôt chimique en phase vapeur dans la partie traitant du verre.

### Références bibliographiques

American National Standards Institute (ANSI), 1988: *Ceramic Tile*, ANSI A 137.1-1988 (New York).

Carniglia et Barria, S.C., 1992: *Handbook of Industrial Refractories Technology: Principles, Types, Properties and Applications* (Park Ridge, New Jersey, Noyes Publications).

Haber, R.A. et Smith, P.A., 1987: *Overview of Traditional Ceramics* (New Brunswick, New Jersey, Ceramic Casting Program, Rutgers, State University of New Jersey).

Tooley, F.V. (directeur de publication), 1974: *The Handbook of Glass Manufacture*, vol. I et II (New York, Books for Industry, Inc.).

### Références complémentaires

Bureau international du Travail (BIT), 2001: *Sécurité dans l'utilisation des laines isolantes en fibres vitreuses synthétiques (laine de verre, laine de roche et laine de laitier)*, recueil de directives pratiques (Genève).

Cransac, M.C., Filloux, J.L., Marez, T. et Serisay, B., 1993: *Le risque chimique dans la céramique*, Document n° 2, Publications A.S.M.T. (Paris, Centre Inter-

prises de santé et de médecine du travail en entreprise).

Kroschwitz, J.I. et Howe-Grant, M. (directeur de publication), 1991: *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4<sup>e</sup> édition (New York, Wiley and Sons).

Lowenstein, K.L., 1983: *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibres* (Amsterdam, New York, Elsevier Science Publishers).

Persson, H.R., 1983: *Glass Technology Manufacturing and Properties* (Séoul, Cheong Moon Gak Publishing Company).