

Rédacteur  
*Michael McCann*

82

### Table des matières

<b>LES OPÉRATIONS DE FUSION ET D’AFFINAGE</b>	
La fusion et l’affinage . . . . .	<i>Pekka Roto</i> 82.2
La fusion et l’affinage du cuivre, du plomb et du zinc . . . . .	82.4
La fusion et l’affinage de l’aluminium. . .	<i>Bertram D. Dinman</i> 82.8
La fusion et l’affinage de l’or. . . . .	<i>I.D. Gadaskina et L.A. Ryzik</i> 82.11
<b>LE TRAITEMENT ET LE TRAVAIL DES MÉTAUX</b>	
Les fonderies . . . . .	<i>Franklin E. Mirer</i> 82.13
Le forgeage et l’emboutissage . . . . .	<i>Robert M. Park</i> 82.22
Le soudage et le découpage thermique des métaux . . . . .	<i>Philip A. Platcow et G.S. Lyndon</i> 82.24
Les tours. . . . .	<i>Toni Retsch</i> 82.32
Le meulage et le polissage . . . . .	<i>K. Welinder</i> 82.35
Les lubrifiants industriels, les fluides d’usinage des métaux et les huiles pour moteurs automobiles . . . . .	<i>Richard S. Kraus</i> 82.37
Le traitement de surface des métaux . . . . .	<i>J.G. Jones, J.R. Bevan, J.A. Catton, A. Zober, N. Fish, K.M. Morse, G. Thomas, M.A. El Kadeem et Philip A. Platcow</i> 82.42
La récupération et le recyclage des métaux non ferreux. . . . .	<i>Melvin E. Cassady et Richard D. Ringenwald, Jr.</i> 82.49
Les problèmes d’environnement posés par les traitements de surface des métaux et les revêtements industriels . . . . .	<i>Stewart Forbes</i> 82.62

### Généralités

L'industrie de la fonte et de l'affinage des métaux transforme les minerais métalliques et les ferrailles en métaux purs. Les différentes branches de la métallurgie travaillent ces métaux pour fabriquer les pièces de machine, les mécanismes, les instruments et les outils dont ont besoin les autres industries et les différents secteurs de l'économie. Sous leurs diverses formes, qu'il s'agisse de produits laminés (barres, bandes, profilés, tôles ou tubes) ou de produits étirés (barres, profilés, tubes ou fils), métaux et alliages servent de matière de départ pour cette fabrication. Les principales techniques métallurgiques sont les suivantes:

- la fusion et l'affinage des minerais métalliques et des ferrailles;
- la coulée des métaux auxquels on veut donner une forme donnée (fonderie), après la fusion;

- le forgeage, au moyen d'appareils de choc ou à la presse, des métaux pour leur donner la forme d'une matrice (forgeage à chaud ou à froid);
- le soudage et le découpage des tôles;
- le frittage (agglomération par chauffage de produits pulvérulents, y compris un ou plusieurs métaux);
- l'usinage des métaux au tour.

Des techniques très diverses sont appliquées pour effectuer le finissage des métaux, y compris le meulage et le polissage, le grenage, auxquels il faut ajouter les procédés de finition et de revêtement des surfaces (électrodéposition, galvanisation, traitement thermique, anodisation, revêtement par poudrage, etc.).

## LES OPÉRATIONS DE FUSION ET D'AFFINAGE

### ● LA FUSION ET L'AFFINAGE

*Pekka Roto\**

Au cours de la production et de l'affinage des métaux, on sépare au moyen d'une série de réactions physiques et chimiques les matériaux précieux des éléments sans valeur. Le produit final est un métal contenant des quantités connues d'impuretés. La fusion et l'affinage primaires permettent d'obtenir des métaux directement à partir des concentrés de minerais, tandis que la fusion et l'affinage secondaires produisent des métaux à partir de ferrailles, de déchets de production, etc. On entend par ferrailles l'ensemble des déchets de pièces métalliques, barres, copeaux de tournage, tôles et fils métalliques qui sont soit hors spécifications, soit usés, mais qui peuvent être recyclés (voir au présent chapitre l'article «La récupération et le recyclage des métaux non ferreux»).

#### Les méthodes métallurgiques

Deux grandes catégories de méthodes sont appliquées pour obtenir des métaux affinés, les *méthodes pyrométallurgiques* et les *méthodes hydrométallurgiques*. Les premières font appel à la chaleur pour séparer des autres matériaux les métaux que l'on souhaite obtenir. Ces opérations tirent parti des différences de potentiels d'oxydation, de points de fusion, de tension de vapeur, de densité ou de miscibilité des composants des minerais à l'état de fusion. Dans les secondes, les métaux recherchés sont séparés des autres matériaux au moyen de techniques qui utilisent les différences de solubilité ou de propriétés électrochimiques des constituants lorsqu'ils sont en solution aqueuse.

#### La pyrométallurgie

Dans la pyrométallurgie, le minerai, une fois *enrichi* (concentré par écrasement, broyage, flottation et séchage) est fritté ou grillé (calciné) en présence d'autres matériaux tels que des poussières de dépoussiérage et un fondant. Le concentré est ensuite fondu dans un haut-fourneau d'où sort le métal brut de première fusion. Ce dernier subit ensuite une troisième opération destinée à l'amener au degré de pureté souhaité. A chaque opération de chauffage de minerai ou de métal brut, il y a production de déchets. Les poussières provenant de la ventilation et les gaz de procédés peuvent être recueillis dans un dépoussiéreur pour être soit élimi-

nés, soit recyclés, selon la teneur résiduelle en métal. Le soufre contenu dans le gaz est également recueilli et, dès que les concentrations dépassent 4%, il peut être converti en acide sulfurique. Selon l'origine du minerai et sa teneur en métaux résiduels, divers métaux tels que l'or et l'argent peuvent aussi être récupérés comme sous-produits.

Le grillage est un important procédé pyrométallurgique. On a recours à un grillage sulfatant pour la production du cobalt et du zinc. Il s'agit de séparer les métaux de manière à les rendre solubles dans l'eau et à pouvoir leur faire subir un second traitement, hydrométallurgique celui-ci.

La fusion des minerais sulfurés permet d'obtenir un concentré de métal partiellement oxydé (la matte). Lors de la fusion, les matières sans valeur, du fer le plus souvent, forment une scorie avec le fondant et sont transformées en oxyde. Dans le convertisseur, la matte débarrassée du fer à l'état de scorie se transforme en métal pur. Cette méthode est utilisée pour la production du cuivre et du nickel. Le fer, le ferrochrome, le plomb, le magnésium et les composés ferreux sont obtenus par fusion réductrice du minerai en présence de charbon de bois et d'un fondant (calcine), la fusion ayant généralement lieu dans un four électrique (voir chapitre n° 73, «La sidérurgie», de l'*Encyclopédie*). L'électrolyse en milieu sels fondus, utilisée pour la production de l'aluminium, est un autre exemple de procédé pyrométallurgique.

Les températures élevées que requiert la pyrométallurgie par voie sèche s'obtiennent en brûlant des combustibles fossiles ou en utilisant la réaction exothermique du minerai lui-même, comme dans le cas du procédé dit de fusion éclair. Ce dernier est un exemple de cette forme de métallurgie consistant à oxyder le fer et le soufre du concentré de minerai. La réaction exothermique obtenue, associée à un système de récupération de la chaleur, permet des économies d'énergie considérables dans l'opération de fusion. Ce procédé, de par la forte proportion de soufre qui peut être récupérée, est également intéressant sur le plan de l'environnement. C'est pourquoi la plupart des installations modernes de production de cuivre et de nickel y font appel.

#### L'hydrométallurgie

On peut citer, entre autres exemples d'hydrométallurgie, la lixiviation, la précipitation, la réduction électrolytique, l'échange d'ions, la séparation sur membrane et l'extraction par solvants. La première étape des procédés hydrométallurgiques consiste à séparer par lixiviation au moyen, par exemple, d'acide sulfurique, les

\* D'après la 3<sup>e</sup> édition de l'*Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*.

métaux intéressants des matières moins valables. La lixiviation est souvent précédée d'un prétraitement (par exemple, grillage sulfatant). Cette opération exige souvent des pressions élevées, l'apport d'oxygène ou de hautes températures. Elle peut également faire appel à l'électricité. A partir de la solution obtenue par lixiviation, le métal souhaité, ou son composé, sont recueillis par précipitation ou réduction, au moyen de diverses méthodes. C'est ainsi que dans la métallurgie du cobalt et du nickel la réduction s'effectue avec un gaz.

L'électrolyse des métaux en solutions aqueuses fait également partie des procédés de l'hydrométallurgie. Dans l'électrolyse, il y a réduction de l'ion métallique au métal. Le métal est dissout dans une solution acide faible à partir de laquelle il précipite sur les cathodes, sous l'influence d'un courant électrique. La plupart des métaux non ferreux peuvent être également affinés par électrolyse.

Souvent aussi, on applique des procédés mixtes, qui combinent pyrométallurgie et hydrométallurgie, selon le concentré de minerai à traiter ou le type de métal à affiner. La production du nickel en est un exemple.

### Les risques et leur prévention

La prévention des risques et des accidents en métallurgie est avant tout une question de formation et de technique. Les examens médicaux sont secondaires et ne viennent qu'en complément de la prévention des risques professionnels. Au sein de l'entreprise, c'est par une collaboration et un échange d'informations poussés entre les services de la planification, de la production, de la sécurité et de la santé au travail que les meilleurs résultats sont obtenus.

Les mesures préventives les plus efficaces et les moins coûteuses sont celles prises dès le stade des études, lors de la construction d'une usine ou de l'introduction d'un nouveau procédé. Si l'on projette de nouvelles installations de production on devrait, au minimum, prendre en considération les aspects suivants:

- les sources potentielles de contaminants atmosphériques devraient être confinées et isolées;
- les différentes machines devraient être conçues et disposées de telle manière qu'elles soient facilement accessibles aux fins de leur maintenance;
- toutes les zones où il existe un risque d'accident devraient être surveillées en permanence, les mises en garde nécessaires étant affichées en bonne place. Par exemple, les zones comportant le risque d'exposition aux arsines ou au cyanure d'hydrogène devraient être surveillées en permanence;
- l'introduction et la manipulation des substances chimiques toxiques devraient être conçues de manière à éviter toute intervention manuelle;
- s'agissant de la protection au travail, il devrait être fait appel chaque fois que possible aux dispositifs d'échantillonnage individuels pour évaluer l'exposition réelle de chaque travailleur. En effet, si les analyses périodiques des gaz, des poussières et du niveau de bruit à poste fixe fournissent bien une approximation de l'exposition, elles ne peuvent jouer qu'un rôle d'appoint en matière d'évaluation des doses d'exposition;
- en ce qui concerne l'aménagement des espaces de travail, il devrait être tenu compte des agrandissements ou des transformations futurs envisagés de manière à éviter toute dégradation des normes en matière de sécurité et de santé au travail;
- il devrait être prévu des moyens permanents de formation et d'instruction, non seulement pour le personnel de sécurité et de santé, mais aussi pour les agents de maîtrise et les travailleurs. Les personnes venant d'être recrutées devraient être complètement informées des risques potentiels et de la manière de s'en prémunir aux différents postes de travail. Enfin, toute introduction de nouveaux procédés de fabrication s'accompagnera d'une formation;

- les pratiques de travail ont également leur importance. Par exemple, le fait de manger et de fumer sur les lieux de travail est de nature à augmenter considérablement l'exposition personnelle;
- la direction devrait mettre en place un système de surveillance fournissant des données suffisantes pour la prise de décisions techniques ou économiques.

Ci-après sont mentionnés les principaux risques et les principales précautions à prendre dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux.

### Les accidents

On trouve dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux un taux d'accidents plus élevé que dans la plupart des autres industries. Parmi les sources d'accidents, on doit citer: les éclaboussures et débords de métal et de laitier en fusion causant des brûlures; les explosions de gaz et les explosions par contact de métal en fusion avec l'eau; les collisions avec des locomotives, des wagons, des grues et autres équipements en mouvement; les chutes d'objets lourds; les chutes à partir d'un point surélevé (par exemple, la cabine d'une grue ou d'un pont roulant); ainsi que les glissades et chutes occasionnés par des obstacles au sol.

Les précautions à prendre comprennent: une formation adéquate; le port d'équipements de protection individuelle (casque, chaussures de sécurité, gants de travail et vêtements de protection); des pratiques correctes en matière de stockage, d'entretien et de maintenance des équipements; l'observation des règles de la circulation dans le cas des équipements en mouvement (avec itinéraires balisés et système efficace de signalisation et d'avertissement); et un programme de protection contre les chutes.

### La chaleur

Les coups de chaleur constituent un risque omniprésent, en raison surtout du rayonnement infrarouge des hauts-fourneaux et du métal en fusion. Le problème se pose de façon particulièrement aiguë lorsqu'il s'agit de travaux pénibles dans un environnement très chaud.

La prévention des troubles liés à la chaleur peut nécessiter la mise en place de rideaux d'eau ou d'air devant les hauts-fourneaux, le refroidissement ponctuel, l'utilisation de cabines fermées et climatisées, de vêtements calorifuges et de combinaisons à refroidissement d'air, des périodes d'acclimatation de durée suffisante, des pauses dans des endroits frais, ainsi qu'une provision suffisante de boissons fraîches.

### Les risques chimiques

Les opérations de fusion et d'affinage sont liées à des expositions aux poussières, vapeurs, gaz et autres substances chimiques. Le concassage et le broyage des minerais peuvent notamment entraîner des expositions élevées aux poussières de silice et de métaux toxiques (contenant du plomb, de l'arsenic et du cadmium, par exemple). Il faut également compter avec les expositions aux poussières lors des travaux d'entretien des hauts-fourneaux. Pendant les opérations de fusion, ce sont les fumées métalliques qui posent le plus de problèmes.

On peut protéger le personnel contre les émissions de poussières et de fumées en confinant les opérations, en automatisant les procédés de fabrication, en recourant à la ventilation avec aspiration localisée ou par dilution, en mouillant les matériaux, en réduisant au minimum leur manutention et en apportant diverses améliorations aux procédés de fabrication. Si cela ne suffit pas, on doit prévoir des appareils de protection respiratoire.

Lors de nombreuses opérations de fusion, il y a émission de grandes quantités de dioxyde de soufre provenant des minerais sulfurés et de monoxyde de carbone résultant des processus de

combustion. Une ventilation avec aspiration localisée ou par dilution est indispensable.

L'acide sulfurique peut être présent soit comme sous-produit des opérations de fusion, soit comme agent employé pour l'affinage électrolytique et la lixiviation des métaux. Il peut y avoir exposition à l'acide sous ses deux formes, liquide et vapeurs. La protection de la peau et des yeux, ainsi qu'une ventilation avec aspiration localisée sont nécessaires.

La fusion et l'affinage de certains métaux présentent des risques particuliers. C'est, par exemple, le cas de l'exposition au nickel-carbonyle dans l'affinage du nickel, aux fluorures dans la fusion de l'aluminium, à l'arsenic dans la fusion et l'affinage du cuivre et du plomb et au mercure et au cyanure dans l'affinage de l'or. Chacune de ces opérations exige des précautions particulières.

#### **Autres risques**

Le rayonnement visible et le rayonnement infrarouge des hauts-fourneaux et du métal en fusion peuvent occasionner des atteintes oculaires, dont la cataracte. Le port de lunettes spéciales et d'écrans faciaux devrait être imposé. Les niveaux élevés de rayonnement infrarouge peuvent être aussi à l'origine de brûlures cutanées en l'absence de vêtements protecteurs.

Les niveaux sonores élevés qui accompagnent le broyage des minerais ou qui sont produits par les souffleries et les fours électriques à haute énergie peuvent être cause de perte auditive. S'il n'est pas possible de confiner ou d'isoler la source du bruit, il y aura lieu de porter des équipements de protection de l'ouïe. Un programme de préservation de l'ouïe, comportant notamment des tests audiométriques et une formation, devrait être mis en place.

Les procédés électrolytiques comportent des risques électriques. Les précautions à prendre comprennent: l'entretien systématique du matériel électrique avec des procédures de consignation/déconsignation; l'emploi de gants, de vêtements et d'outils isolants; et, lorsqu'il y a lieu, de disjoncteurs différentiels.

Le levage à la main et la manutention des matériaux peuvent être des causes de lésions du dos et des membres supérieurs. Ces problèmes peuvent être atténués par le recours aux engins de levage et par une formation appropriée aux méthodes de levage.

#### **La pollution et la protection de l'environnement**

Les émissions de gaz irritants et corrosifs tels que le dioxyde de soufre, le sulfure d'hydrogène et le chlorure d'hydrogène peuvent causer une pollution de l'air et des effets de corrosion des métaux et du béton tant dans l'entreprise qu'à ses abords immédiats. La tolérance de la végétation au dioxyde de soufre varie selon le type de forêt et de sol. D'une manière générale, les résineux tolèrent des concentrations de dioxyde de soufre plus faibles que les essences à feuilles caduques. Les émissions de particules peuvent contenir des particules non spécifiques, des fluorures, du plomb, de l'arsenic, du cadmium et nombre d'autres métaux toxiques. Quant aux eaux usées, elles peuvent renfermer divers métaux toxiques, de l'acide sulfurique et d'autres impuretés. Enfin, les déchets solides peuvent être contaminés par de l'arsenic, du plomb, des sulfures de fer, de la silice et d'autres polluants.

Une bonne gestion des fonderies devrait inclure l'évaluation et la réduction des émissions. Il s'agit d'une tâche spécialisée qui ne saurait être confiée qu'à un personnel parfaitement informé des propriétés chimiques et de la toxicité des matériaux émis lors des opérations de fabrication. L'état physique du matériau, la température à laquelle il est libéré, les autres matériaux contenus dans le courant gazeux sont quelques-uns des facteurs qu'il convient de prendre en considération au stade de la planification des mesures de dépollution. Il est également souhaitable que l'entreprise dispose d'une station météorologique, tienne des archives météorologiques et soit prête à réduire la production lorsque les conditions climatiques ne permettent pas une dispersion efficace des effluents

de cheminée. Des visites sur le terrain sont en outre nécessaires pour contrôler les effets de la pollution de l'air dans les quartiers d'habitation et les exploitations rurales.

Le dioxyde de soufre, qui est l'un des contaminants majeurs, est normalement récupéré sous forme d'acide sulfurique lorsqu'il est présent en quantité suffisante. Dans les autres cas, le dioxyde de soufre et les autres déchets gazeux dangereux doivent être retenus par lavage pour satisfaire aux normes en matière d'émissions. Quant aux émissions de particules, elles sont le plus souvent réduites au moyen d'appareils de filtration équipés de filtres en textile et d'appareils électrostatiques.

Les opérations de flottation telles que la concentration du cuivre nécessitent d'importantes quantités d'eau. Cette eau est en grande majorité recyclée dans le procédé. Les déchets de flottation sont évacués par pompage sous forme de boues dans des bassins de décantation, l'eau étant recyclée. Les eaux industrielles et les eaux de pluie contenant des métaux sont purifiées dans des installations de traitement des eaux avant d'être évacuées ou recyclées.

Les déchets en phase solide comprennent les scories de fonderie, les boues résiduelles de la conversion du dioxyde de soufre en acide sulfurique, ainsi que les boues provenant des retenues superficielles (par exemple, bassins de décantation). Certaines scories peuvent être reconcentrées et renvoyées à la fonderie pour retraitement ou récupération d'autres métaux. Parmi ces déchets en phase solide, un bon nombre sont dangereux et doivent donc être stockés conformément à la réglementation environnementale.

## **LA FUSION ET L'AFFINAGE DU CUIVRE, DU PLOMB ET DU ZINC\***

### **Le cuivre**

Le cuivre est extrait dans des mines à ciel ouvert ainsi que dans des mines souterraines, selon la teneur du minerai et la nature du gisement. En règle générale, le minerai de cuivre contient moins de 1% de cuivre sous forme de minerais sulfurés. Une fois amené au jour, le minerai est réduit par broyage à l'état pulvérulent, puis concentré par flottation. Le principe de la flottation consiste à injecter de l'air en fines bulles dans la boue qui contient le minerai et à laquelle on a ajouté divers réactifs. Les bulles d'air se fixent au minerai de cuivre et forment une mousse qui monte à la surface des cuves de flottation. Le concentré contient entre 20 et 30% de cuivre. La gangue, séparée du produit utile, tombe au fond des cuves d'où elle est extraite et déshydratée par des épaisseurs et transportée sous forme de boues épaisses jusqu'à un bassin pour élimination. Toute l'eau utilisée lors de cette opération, qu'elle provienne des épaisseurs ou du bassin, est récupérée et recyclée dans le processus.

Selon le type de minerai qui sert de charge, le cuivre peut être obtenu par voie pyrométallurgique ou par voie hydrométallurgique. Les concentrés de minerai, ou mixte, qui contiennent des sulfures de cuivre et de fer, subissent un traitement pyrométallurgique qui donne un cuivre extrêmement pur. Les minerais riches en oxyde, qui renferment des minéraux riches en oxyde de cuivre qui peuvent se trouver dans d'autres parties de la mine, ainsi que d'autres déchets oxydés, sont traités par des méthodes hydrométallurgiques grâce auxquelles on obtient également du cuivre très pur.

La conversion du mixte en métal s'opère par fusion. Au cours de la fusion, les concentrés sont séchés pour alimenter l'un ou l'autre des types de fours. Les sulfures sont alors partiellement

\* D'après Environmental Protection Agency (EPA), 1995.

oxydés et fondus. En fin d'opération, une couche de scories liquides surnage au-dessus d'une matte liquide, ou cuivre noir, contenant du sulfure de cuivre et du sulfure de fer.

La matte liquide subit ensuite une conversion. Les scories sont évacuées par basculement du convertisseur et stockées ou mises en crassier sur place. Une petite partie est vendue pour servir de ballast de chemin de fer, ainsi que pour le décapage par grenailage. Un troisième produit de la fusion est le dioxyde de soufre, gaz qui est recueilli, purifié et transformé en acide sulfurique pour la vente ou pour servir aux opérations de lixiviation en hydrométallurgie.

Après la fusion, la matte passe par le convertisseur. Lors de cette opération, elle est déversée dans un récipient cylindrique horizontal (d'environ 10 × 4 m) doté d'une rangée de tuyères. Ces dernières, qui font projection dans le cylindre, servent à introduire de l'air dans le convertisseur. On ajoute de la chaux et de la silice à la matte pour lui permettre de réagir en présence de l'oxyde de fer du procédé pour former des scories. On peut également ajouter de la «mitraille rouge» ou du vieux cuivre dans le convertisseur. On submerge les tuyères par basculement du convertisseur, puis on insuffle de l'air dans la matte en fusion pour permettre au reste du sulfure de fer de réagir avec l'oxygène en donnant de l'oxyde de fer et du dioxyde de soufre. Un nouveau basculement du convertisseur permet d'évacuer le silicate de fer qui forme les scories.

Une fois le fer extrait, on procède à un nouveau basculement du convertisseur et l'on insuffle à nouveau de l'air, ce qui permet d'oxyder le reste du soufre et de l'extraire du sulfure de cuivre. Le basculement du convertisseur permet alors de déverser le cuivre en fusion, appelé à ce stade «cuivre blister» (ainsi nommé parce que, si on le laissait se solidifier, il présenterait une surface granuleuse due à la présence d'oxygène et de soufre à l'état gazeux). Le dioxyde de soufre provenant du convertisseur est recueilli et renvoyé au système d'épuration des gaz en même temps que celui qui provient du four de fusion, et transformé en acide sulfurique. Étant donné leur teneur résiduelle en cuivre, les scories sont renvoyées au four pour y être recyclées.

Le cuivre blister, qui contient au minimum 98,5% de cuivre, subit alors un affinage en deux phases. La première consiste en un affinage au feu au cours duquel le cuivre blister est versé en fusion dans un four cylindrique, dont l'aspect rappelle celui d'un convertisseur, où l'on insuffle d'abord de l'air, puis du gaz naturel ou du propane pour éliminer le reste de soufre et d'oxygène que pourrait encore contenir le cuivre. Le cuivre en fusion est ensuite versé dans une roue de coulée pour former des anodes qui sont suffisamment pures pour subir l'affinage électrolytique.

Dans l'affinage électrolytique, les anodes en cuivre sont placées dans des cuves d'électrolyse et intercalées avec des feuilles de départ en cuivre, ou cathodes, dans un bain de sulfate de cuivre en solution. Lorsqu'on fait passer un courant continu dans la cuve d'électrolyse, le cuivre de l'anode se dissout, est transporté avec l'électrolyte et redéposé sur les feuilles de départ. Lorsque les cathodes ont atteint une épaisseur suffisante, on les retire de la cuve d'électrolyse pour les remplacer par un nouveau jeu de feuilles de départ. Les impuretés solides des anodes tombent au fond de la cuve sous forme de boues où elles sont recueillies et retraitées pour récupérer les métaux précieux tels que l'or et l'argent. C'est ce qu'on appelle la boue anodique.

Les cathodes extraites de la cuve d'électrolyse sont la principale source de production de cuivre et contiennent  $\geq 99,99\%$  de métal. Elles sont soit vendues telles quelles aux tréfileries ou subissent une nouvelle transformation destinée à produire des barres. Pour la fabrication de ces dernières, les cathodes sont fondues dans un four à cuve, le cuivre en fusion étant versé sur une roue de coulée pour former une barre pouvant être laminée afin d'obtenir un produit continu d'environ 1 cm de diamètre. Ce produit est expé-

dié aux tréfileries où il est extrudé pour donner des fils de cuivre de divers diamètres.

Dans le procédé hydrométallurgique, les minerais et les déchets oxydés sont lessivés avec de l'acide sulfurique provenant de l'opération de fusion. La lixiviation s'effectue sur place, ou sur des tas spécialement préparés, l'acide étant répandu également à la partie supérieure de manière à percoler à travers la matière jusqu'à un point bas où il est recueilli. Sous les aires de lixiviation, le sol est doublé d'un matériau en plastique imperméable et résistant à l'acide pour empêcher toute contamination de la nappe phréatique. Une fois recueillies, les solutions riches en cuivre peuvent subir l'un ou l'autre des deux traitements suivants: la cémentation ou l'extraction par solvant/extraction électrolytique. Avec le procédé de la cémentation (rarement utilisé aujourd'hui), le cuivre en solution acide se dépose à la surface de ferrailles où il s'échange avec le fer. Lorsque l'accumulation de cuivre est suffisante, le fer enrichi de cuivre est placé dans le four avec les concentrés de minerai en vue de récupérer le cuivre par pyrométallurgie.

Dans le procédé d'extraction par solvant/extraction électrolytique, la solution obtenue par lixiviation est concentrée par extraction au solvant, ce qui permet d'extraire le cuivre sans les impuretés (fer et autres matériaux). La solution organique chargée de cuivre est ensuite séparée du lixiviat dans un bac de sédimentation. On ajoute de l'acide sulfurique à la solution organique, ce qui permet d'entraîner le cuivre dans une solution électrolytique. Le lixiviat, qui contient le fer et les autres impuretés, est renvoyé vers le processus de lixiviation, pour réutilisation de l'acide. La solution riche en cuivre est alors dirigée vers une cuve d'extraction électrolytique. Cette dernière se distingue de la cuve d'électroraffinage par le fait qu'elle utilise une anode permanente et insoluble. À ce stade, le cuivre en solution se dépose sur une cathode constituée d'une feuille de départ, comme cela se produit sur la cathode d'une cuve à raffinage électrolytique. L'électrolyte d'où le cuivre a été extrait est renvoyé vers le procédé d'extraction par solvant où il est à nouveau utilisé pour extraire le cuivre de la solution organique. Les cathodes obtenues par le procédé d'extraction électrolytique sont vendues ou transformées en barres de la même manière que celles fournies par le procédé d'électroraffinage.

Les cuves d'extraction électrolytiques servent également à l'élaboration de feuilles de départ destinées aux deux procédés; on décolle la feuille de cuivre après que celui-ci s'est déposé sur des cathodes en acier inoxydable ou en titane.

### **Les risques et leur prévention**

Les principaux risques sont ceux de l'exposition aux poussières de minerai pendant la transformation et la fusion du minerai, les fumées métalliques (cuivre, plomb et arsenic principalement) pendant la fusion, le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone au cours de la plupart des opérations de fusion, le bruit des opérations de broyage et des fours, la chaleur dégagée par les fours ainsi que les risques présentés tant par l'acide sulfurique que par l'électrolyte au cours des opérations d'électrolyse.

Les précautions à prendre comprennent: une ventilation avec aspiration localisée dans le cas des poussières occasionnées par les opérations de transfert; une ventilation avec aspiration localisée ou par dilution pour le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone; un programme de réduction du bruit et de protection de l'ouïe; le port de vêtements et l'utilisation d'écrans protecteurs; des périodes de repos et des boissons en quantités suffisantes contre les coups de chaleur; et, enfin, une ventilation avec aspiration localisée, un équipement de protection individuelle et des précautions électriques lorsqu'il s'agit d'opération d'électrolyse. Il est d'usage de recourir en outre à des appareils de protection respiratoire pour la protection contre les poussières, les fumées et le dioxyde de soufre.

Tableau 82.1 • Procédés, matières mises en œuvre et émissions polluantes dans la métallurgie du cuivre

Procédés	Matières mises en œuvre	Émissions atmosphériques	Déchets de production	Autres déchets
Concentration du cuivre	Minerai de cuivre, eau, réactifs, épaississants		Eaux usées de flottation	Déchets de minerai contenant des minéraux tels que la chaux et le quartz
Lixiviation du cuivre	Concentré de cuivre, acide sulfurique		Sous-produits de la lixiviation	Déchets de la lixiviation en tas
Fusion du cuivre	Concentré de cuivre, fondant siliceux	Dioxyde de soufre, particules contenant de l'arsenic, de l'antimoine, du cadmium, du plomb, du mercure et du zinc		Boues acides de vidange de l'appareillage, scories contenant des sulfures de fer et de la silice
Conversion du cuivre	Matte, scories de cuivre, fondant siliceux	Dioxyde de soufre, particules contenant de l'arsenic, de l'antimoine, du cadmium, du plomb, du mercure et du zinc		Boues acides de vidange de l'appareillage, scories contenant des sulfures de fer et de la silice
Affinage du cuivre par électrolyse	Cuivre blister, acide sulfurique			Boues contenant des impuretés telles que or, argent, antimoine, arsenic, bismuth, fer, plomb, nickel, sélénium, soufre et zinc

Le tableau 82.1 énumère les polluants environnementaux libérés aux différentes étapes de la fusion et de l'affinage du cuivre.

### Le plomb

Le principal procédé de production du plomb comporte quatre étapes: grillage, fusion, écumage et affinage par voie pyrométallurgique. Pour commencer, on alimente un four d'agglomération en galère, minerai qui contient essentiellement du sulfure de plomb. On peut ajouter d'autres charges: fer, silice, castine, coke, carbonate de soude, cendres, pyrite, zinc, ainsi qu'une matière basique et des particules recyclées provenant des équipements de dépollution. Dans le four, la charge est soumise à des jets d'air chaud qui brûlent complètement le soufre, avec dégagement de dioxyde de soufre. L'oxyde de plomb fourni par ce procédé contient environ 9% de son poids en carbone. On charge alors dans un haut-fourneau l'aggloméré, accompagné de coke, de divers matériaux de recyclage et de déchets d'épuration, de chaux et autres fondants; l'oxyde de plomb est réduit par le carbone et son monoxyde, et le fer déplace le plomb du sulfure PbS résiduel. On recueille dans le creuset, de haut en bas, du «speiss» (matériau le plus léger, constitué principalement d'arsenic et d'antimoine); de la matte (sulfure de cuivre et autres sulfures métalliques); des scories (silicates principalement); et du plomb impur (98% de plomb en poids), appelé plomb d'œuvre. Chacune de ces couches est prélevée séparément. Le speiss et la matte sont vendus aux fondeurs de cuivre qui en récupèrent les éléments intéressants (cuivre et métaux précieux). Les scories qui contiennent du zinc, du fer, de la silice et de la chaux sont mises en crassier et partiellement recyclées. Dans les hauts-fourneaux, les petites quantités de sulfure de plomb et de sulfates de plomb résiduels contenues dans l'aggloméré causent des émissions d'oxyde de soufre.

Le plomb d'œuvre de haut-fourneau doit généralement être soumis à un traitement préliminaire en cuves avant de subir les opérations d'affinage. Au cours des opérations d'écumage, le plomb d'œuvre est agité dans une cuve, puis refroidi jusqu'à une température légèrement supérieure à son point de solidification (370 à 425 °C). L'écume, composée d'oxyde de plomb, avec du cuivre, de l'antimoine et d'autres éléments, flotte et se solidifie à la surface du bain de plomb fondu.

L'écume est retirée et envoyée dans un four pour récupération des métaux intéressants autres que le plomb. Pour faciliter la récupération du cuivre, on traite le plomb d'œuvre liquide en y ajoutant de la fleur de soufre, du zinc ou de l'aluminium, ce qui permet de ramener la teneur en cuivre à environ 0,01%.

Au cours de la quatrième étape, le plomb d'œuvre est affiné par des procédés pyrométallurgiques pour en extraire les éléments intéressants autres que le plomb (or, argent, bismuth, zinc et oxydes métalliques tels que les oxydes d'antimoine, d'arsenic, d'étain et de cuivre). L'affinage se fait dans une cuve en fonte en cinq phases. On commence par extraire l'antimoine, l'étain et l'arsenic. On ajoute ensuite du zinc pour récupérer l'or et l'argent dans les scories de zinc. Le zinc est ensuite extrait par distillation sous vide. L'affinage se poursuit avec l'addition de calcium et de magnésium qui se combinent avec le bismuth pour former un composé insoluble, lequel est enlevé sous la forme d'écume à la surface du bain. On peut enfin ajouter au plomb de la soude caustique ou des nitrates pour éliminer les dernières traces d'impuretés. Le plomb affiné, dont la pureté est comprise entre 99,90 et 99,99%, peut être allié à d'autres métaux ou versé directement dans des lingotières.

### Les risques et leur prévention

Les principaux risques sont ceux de l'exposition aux poussières de minerai au cours du traitement et de la fusion du minerai, aux fumées métalliques (surtout plomb, arsenic et antimoine) au cours de la fusion, au dioxyde de soufre et au monoxyde de carbone au cours de la plupart des opérations de fusion, ainsi qu'au bruit des machines de broyage et de concassage et des fours, et à la chaleur des hauts-fourneaux.

Les précautions à prendre comprennent: un dépoussiérage lors des opérations de transfert; une ventilation avec aspiration localisée ou par dilution pour le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone; un programme de réduction du bruit et de protection de l'ouïe; l'utilisation de vêtements et d'écrans protecteurs; des temps de repos et des boissons en quantités suffisantes pour lutter contre la chaleur. Il est d'usage de recourir en outre à un appareil de protection respiratoire pour se prémunir contre les poussières, les fumées et le dioxyde de soufre. Enfin, à l'égard du plomb, la surveillance biologique est indispensable.

On trouvera énumérés au tableau 82.2 les polluants environnementaux libérés aux différentes étapes de la fusion et de l'affinage du plomb.

### Le zinc

Le concentré de zinc s'obtient en séparant le minerai, qui ne contient parfois que 2% de zinc, de la gangue par broyage et flottation, opération habituellement exécutée à la mine. On réduit ensuite le concentré de zinc en zinc métallique de deux manières:

Tableau 82.2 • Procédés, matières mises en œuvre et émissions polluantes dans la métallurgie du plomb

Procédés	Matières mises en œuvre	Emissions atmosphériques	Déchets de production	Autres déchets
Frittage du plomb	Minerai de plomb, fer, silice, fondant calcique, coke, carbonate de sodium anhydre, pyrite, zinc, substances caustiques, poussières de dépolluierage	Dioxyde de soufre, particules contenant du cadmium et du plomb		
Fusion du plomb	Fritte de plomb, coke	Dioxyde de soufre, particules contenant du cadmium et du plomb	Eaux usées produites par le lavage des installations au jet, eau de granulation des scories	Scories contenant des impuretés telles que zinc, fer, silice et chaux, matières solides provenant de la rétention des eaux de ruissellement
Décrassage du plomb	Plomb d'œuvre, carbonate de sodium anhydre, soufre, poussières de dépolluierage, coke			Scories contenant des impuretés telles que cuivre, matières solides provenant de la rétention des eaux de ruissellement
Affinage du plomb	Crasses de plomb liquides			

soit par la voie pyrométallurgique par distillation (dans des cornues réfractaires), soit par la méthode électrolytique. C'est au moyen de cette dernière méthode que sont produits près de 80% du zinc affiné.

Pour l'affinage hydrométallurgique du zinc, on applique généralement quatre procédés successifs: calcination, lixiviation, purification et électrolyse. La calcination, ou grillage, fait appel à des températures élevées (700 à 1 000 °C) destinées à convertir le sulfure de zinc en oxyde de zinc impur appelé calcine. Les fours de calcination peuvent être à soles multiples, à suspension ou à lit fluidisé. En règle générale, on commence, pour la calcination, à mélanger le composé de zinc avec du charbon. Le mélange est alors chauffé, ou grillé, de manière à transformer l'oxyde de zinc en vapeur qui sera entraînée hors de la chambre avec les gaz sortants. Ceux-ci sont ensuite envoyés dans le dépoussiéreur, où l'oxyde de zinc est retenu dans les poussières captées.

Tous les procédés de calcination libèrent du dioxyde de soufre, lequel est recueilli et transformé en acide sulfurique pour la vente.

L'électrolyse de la calcine désulfurée comporte trois étapes principales: lixiviation, épuration et électrolyse. La lixiviation consiste à dissoudre la calcine dans une solution d'acide sulfurique pour former une solution de sulfate de zinc. La calcine peut être lessivée une ou deux fois. S'il y a double lixiviation, elle est dissoute dans une solution légèrement acidulée pour en extraire les sulfates. La

calcine est ensuite lessivée une seconde fois dans une solution plus forte qui dissout le zinc. Cette seconde lixiviation est en fait le début de la troisième étape de l'épuration parce que bon nombre des impuretés riches en fer se déposent en même temps que le zinc.

Après le lessivage, la solution est purifiée en deux étapes (ou plus) par adjonction de poussière de zinc. La solution est épurée dans la mesure où cette poussière de zinc cause la précipitation des éléments indésirables, ce qui permet de les recueillir par filtration. L'épuration est généralement conduite dans de grands bacs à agitation. L'opération s'effectue à des températures comprises entre 40 et 85 °C et à des pressions allant de 1 à 2,4 atmosphères. Les éléments recueillis au cours de l'épuration sont des «boues bleues» contenant une forte proportion de cuivre et de cadmium. Après épuration de la solution, le zinc est extrait de la liqueur restante par électrolyse.

L'électrolyse du zinc a lieu dans des cuves d'électrolyse, et consiste à faire passer un courant électrique dans la liqueur entre des anodes en alliage de plomb-argent et des cathodes en aluminium. Le zinc en suspension se dépose sur ces feuilles d'aluminium plongées dans la solution. Toutes les vingt-quatre à quarante-huit heures, chacune des cuves est fermée, les cathodes revêtues de zinc retirées et rincées et le zinc détaché par des moyens mécaniques des feuilles d'aluminium. Le concentré de zinc, qui titre souvent jusqu'à 99,99% de zinc, est ensuite fondu et moulé en lingots.

Tableau 82.3 • Procédés, matières mises en œuvre et émissions polluantes dans la métallurgie du zinc

Procédés	Matières mises en œuvre	Emissions atmosphériques	Déchets de production	Autres déchets
Calcination du zinc	Minerai de zinc, coke	Dioxyde de soufre, particules contenant du zinc et du plomb		Boues acides de vidange de l'appareillage
Lixiviation du zinc	Calcine, acide sulfurique, chaux, électrolyte épuisé		Eaux usées contenant de l'acide sulfurique	
Affinage du zinc	Solution zinc-acide, poussières de zinc		Eaux usées contenant de l'acide sulfurique et du fer	Cuivre en plaques, cadmium
Electrolyse du zinc	Zinc dans une solution aqueuse d'acide sulfurique, anodes en alliage plomb-argent, cathodes en aluminium, carbonate de baryum ou strontium, additifs colloïdaux		Acide sulfurique dilué	Boues de cuves d'électrolyse

Les installations d'électrolyse du zinc peuvent contenir plusieurs centaines de cuves. Une partie de l'énergie électrique est transformée en chaleur, ce qui accroît la température de l'électrolyte. Les cuves d'électrolyse fonctionnent à des températures comprises entre 30 et 35 °C à la pression atmosphérique. Au cours de l'électrolyse, une partie de l'électrolyte est envoyée dans des tours de refroidissement pour en abaisser la température et faire évaporer l'eau recueillie au cours du procédé.

#### **Les risques et leur prévention**

Les principaux risques sont ceux de l'exposition aux poussières de minerai au cours de son traitement et de sa fusion, aux fumées métalliques (zinc et plomb surtout) lors de l'affinage et du grillage, au dioxyde de soufre et au monoxyde de carbone pendant la plupart des opérations de fusion, ainsi qu'au bruit des machines de broyage et de concassage et des fours, à la chaleur des fours et, s'agissant des procédés électrolytiques, à l'acide sulfurique et à l'électricité.

Les précautions à prendre comprennent: une ventilation avec aspiration localisée à l'égard des poussières au cours des opérations de transfert; une ventilation avec aspiration localisée ou par dilution pour le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone; un programme de réduction du bruit et de protection de l'ouïe; l'utilisation de vêtements et d'écrans protecteurs; des périodes de repos et des boissons en quantités suffisantes pour protéger contre les coups de chaleur et, enfin, dans le cas des procédés d'électrolyse, une ventilation avec aspiration localisée, un équipement de protection individuelle et les précautions d'usage en matière électrique. On a l'habitude de recourir en outre à un appareil de protection respiratoire pour se prémunir contre les poussières, les vapeurs et le dioxyde de soufre.

On trouvera énumérés au tableau 82.3 les polluants environnementaux libérés aux différentes étapes de la fusion et de l'affinage du zinc.

## ● LA FUSION ET L'AFFINAGE DE L'ALUMINIUM

*Bertram D. Dinman*

### **Généralités**

On extrait la bauxite de mines à ciel ouvert. Les minerais les plus riches sont utilisés tels quels. Les minerais de moindre qualité sont broyés et lavés pour en retirer l'argile et la silice. La production du métal comporte deux étapes principales:

1. *l'affinage*: on obtient l'alumine à partir de la bauxite par le procédé Bayer qui consiste à soumettre le minerai à l'action de la soude caustique dans un autoclave à forte température et sous une pression élevée. L'alumine hydratée est cristallisée et calcinée de manière à donner  $Al_2O_3$  anhydre dans un four ou four à griller à lit fluidisé;
2. *la réduction*: la réduction électrolytique de l'alumine s'effectue au moyen du procédé électrolytique Hall-Héroult avec électrodes en carbone et bain de cryolithe fondue.

D'après les résultats d'essais expérimentaux, il devrait être possible à l'avenir d'obtenir l'aluminium par réduction directe à partir du minerai.

Il existe actuellement deux types principaux de cuves d'électrolyse Hall-Héroult en usage. Le procédé dit à «précuisson» fait appel à des électrodes fabriquées comme indiqué ci-après. Dans ces appareils, il peut y avoir exposition aux hydrocarbures polycycliques dans les installations où sont fabriquées les électrodes et,

notamment, lors de l'agglomération et de la mise en forme à la presse. Les usines qui utilisent la cuve Söderberg ne nécessitent pas d'installations de cuisson des anodes de carbone. En fait, la pâte de coke de pétrole et de brai est placée dans des trémies dont les extrémités inférieures sont immergées dans le bain de cryolithe et d'alumine en fusion. A mesure que la pâte de brai et de coke est chauffée par le bain de métal et de cryolithe en fusion à l'intérieur de la cuve, le mélange subit une cuisson qui le transforme en une masse graphitique dure, sur place. Des barres métalliques sont introduites dans la masse anodique où elles servent de conducteur à un courant électrique continu. Ces barres doivent être remplacées périodiquement; lorsqu'on les retire, il se dégage dans l'atmosphère de la cuve des quantités considérables de matières volatiles constituées de brai. A cette exposition s'ajoute celle des matières volatiles dégagées par la cuisson de la pâte de brai et de coke.

Au cours des dernières années, l'industrie s'est efforcée de remplacer ou de modifier les installations du type Söderberg dont il avait été prouvé qu'elles présentaient un risque cancérigène. En outre, avec les progrès de l'automatisation des opérations dans les cuves — s'agissant notamment du changement des anodes —, les différentes tâches sont de plus en plus exécutées à partir de grues mécaniques complètement fermées. Il en résulte que, dans les usines modernes, l'exposition des travailleurs et le risque de développer des affections liées à la fusion de l'aluminium sont en régression. A l'inverse, dans les pays qui ne disposent pas des moyens financiers suffisants, le maintien d'usines plus vétustes, où les opérations restent manuelles, continuera à présenter les risques de maladies professionnelles (voir ci-après) précédemment liés aux usines d'aluminium. Bien plus, la tendance ne fera que s'aggraver, à mesure de leur vieillissement, dans les établissements anciens qui n'auront pas été modernisés.

### **La fabrication des électrodes en carbone**

Les électrodes précuites nécessaires à l'obtention du métal pur par électrolyse ignée sont normalement fabriquées dans un atelier contigu à l'usine d'aluminium. Le plus souvent, les anodes et les cathodes sont fabriquées à partir d'un mélange de coke de pétrole préalablement broyé et de brai. Le coke est d'abord broyé dans des broyeurs à boulets puis, après avoir été mélangé mécaniquement avec le brai, filé à la presse pour donner des prismes. Ces derniers, anodes ou cathodes, sont ensuite chauffés dans un four à gaz pendant plusieurs jours jusqu'à ce qu'ils forment des masses graphitiques dures débarrassées de la quasi-totalité des matières volatiles. Ils sont finalement introduits dans les fourreaux des anodes ou rainurés pour recevoir les barres des cathodes.

Il convient de noter que le brai employé pour former les électrodes est le résidu ultime de la distillation des goudrons de houille. Lors de la transformation du goudron en brai obtenue par chauffage, le produit fini (brai) s'est débarrassé par ébullition de la presque totalité de ses matières inorganiques à point d'ébullition bas, et notamment du  $SO_2$ , ainsi que des composés aliphatiques et des composés aromatiques à un et deux cycles. Il en résulte que ce brai ne devrait pas présenter les mêmes risques que les goudrons de houille ou de pétrole, dans la mesure où ces classes de composés ne devraient pas s'y trouver. On a des raisons de croire que le potentiel cancérigène de ces produits à base de brai pourrait ne pas être aussi élevé que celui du mélange plus complexe de goudrons et autres matières volatiles liés à la combustion incomplète du charbon.

### **Les risques et leur prévention**

S'agissant des opérations de fusion et d'affinage de l'aluminium, les risques et les mesures préventives sont essentiellement les mêmes que ceux qui caractérisent les opérations de fusion et d'affinage en général; toutefois, les procédés mis en œuvre comportent certains risques spécifiques.

### L'extraction minière

Bien que la littérature spécialisée fasse occasionnellement référence à la «maladie de la bauxite», l'existence de cette affection est loin d'être prouvée. Toutefois, il y a lieu d'envisager la présence possible de silice cristalline dans la bauxite.

### Le procédé Bayer

L'utilisation en quantités abondantes de la soude caustique dans le procédé Bayer présente des risques fréquents de brûlures chimiques de la peau et des yeux. Le décalaminage des réservoirs au marteau-piqueur expose à des niveaux sonores très élevés. La question des risques potentiels liés à l'inhalation de doses excessives de l'oxyde d'aluminium dégagé par le procédé sera traitée ci-après.

Toutes les personnes qui ont à intervenir dans le procédé Bayer doivent être parfaitement informées des risques que comporte la manipulation de la soude caustique. Dans tous les endroits exposés, il devrait être prévu des fontaines oculaires, des lavabos avec eau courante et des douches d'urgence, avec notices explicatives. Un équipement de protection individuelle (lunettes, gants, tabliers et bottes) devrait être fourni, de même que des douches et des vestiaires à double casier (l'un pour les vêtements de travail, l'autre pour les vêtements de ville), toutes les personnes étant invitées à se laver soigneusement à la fin du poste de travail. Les travailleurs appelés à manipuler du métal en fusion devraient être équipés de visières, d'appareils respiratoires, de gants à crispins, de tabliers et de guêtres destinés à les protéger contre les brûlures, les poussières et les vapeurs. Les travailleurs employés au procédé Gadeau à basse température devraient être équipés de combinaisons et de gants spéciaux destinés à les protéger des vapeurs d'acide chlorhydrique dégagées au moment du démarrage des cuves; la laine a fait la preuve de sa bonne résistance à l'égard de ces vapeurs. Les appareils respiratoires équipés de cartouches au charbon de bois ou de masques imprégnés d'alumine confèrent une bonne protection contre les vapeurs de brai et de fluor; des masques antipoussières efficaces sont nécessaires pour se protéger contre les poussières. Quant aux travailleurs exposés à des poussières et à des vapeurs plus nocives, notamment lors des opérations du procédé Söderberg, ils devraient être munis d'un équipement de protection respiratoire à alimentation d'air. Dans la mesure où le travail des cuves est de plus en plus effectué à distance, à partir de cabines entièrement fermées, ces mesures de protection seront de moins en moins nécessaires.

### La réduction électrolytique

La réduction électrolytique expose les travailleurs au risque de brûlures cutanées et d'accidents imputables aux éclaboussures de

métal en fusion, au coup de chaleur, au bruit, aux risques électriques, ainsi qu'aux vapeurs de cryolithe et d'acide fluorhydrique. En outre, les cuves d'électrolyse peuvent dégager de grandes quantités de poussières de fluorure et d'alumine.

Dans les ateliers où sont fabriquées les électrodes en carbone, on devrait installer un équipement de ventilation avec aspiration doté de filtres à manche; en outre, en enfermant les équipements de broyage du brai et du carbone, on réduit au minimum les expositions au brai chaud et aux poussières de charbon. Il devrait être procédé régulièrement, au moyen d'un dispositif de prélèvement approprié, à la vérification des concentrations de poussières dans l'atmosphère. Les travailleurs exposés à ces poussières devraient être soumis à des examens radiologiques périodiques, complétés en cas de besoin par des examens cliniques.

Pour limiter les risques inhérents à la manipulation du brai, les transports devraient être mécanisés le plus possible (par exemple, on peut utiliser des camions-citernes chauffés pour apporter le brai liquide jusqu'aux ateliers où il sera automatiquement transféré par pompage dans des bacs, également chauffés). Des examens réguliers de la peau destinés à déceler les érythèmes, les épithéliomes ou les dermites sont également recommandés, une protection supplémentaire pouvant être conférée par l'application de crèmes barrière à base d'alginate.

Les personnes appelées à travailler en atmosphère chaude devraient recevoir pour instructions, avant la saison des chaleurs, de boire davantage et de saler fortement la nourriture. Elles-mêmes, et leurs agents de maîtrise, apprendront à reconnaître, chez eux et chez leurs collègues de travail, les premiers signes de malaises dus à la chaleur. Tous ceux qui travaillent dans ces usines devraient connaître les précautions à prendre pour éviter l'apparition ou l'aggravation de troubles liés à la contrainte thermique.

Les travailleurs exposés à des niveaux sonores élevés devraient être pourvus d'appareils de protection de l'ouïe et, notamment, de protecteurs qui laissent passer les bruits à basse fréquence (pour permettre la perception des ordres), mais réduisent la transmission des bruits intenses de haute fréquence. En outre, les travailleurs devraient subir régulièrement des examens audiométriques destinés à déceler toute perte auditive. Enfin, le personnel devrait également apprendre à pratiquer la réanimation cardio-respiratoire sur les victimes d'une électrocution.

Dans les établissements d'électrolyse et installations du même genre, le risque de projection de métal en fusion et de brûlures graves est omniprésent. Sans préjudice de l'obligation du port de vêtements protecteurs (par exemple, gants, tabliers, guêtres et visières), le port de vêtements en tissus synthétiques devrait être

Tableau 82.4 • Procédés, matières mises en œuvre et émissions polluantes dans la métallurgie de l'aluminium

Procédé	Matières premières mises en œuvre	Emissions atmosphériques	Déchets de production	Autres déchets
Affinage de la bauxite	Bauxite, hydroxyde de sodium	Particules, substances caustiques/ vapeur d'eau		Résidus contenant du silicium, du fer, du titane, des oxydes de calcium et une substance caustique
Filtration et hydrolyse de l'alumine	Liqueur claire, amidon, eau		Eaux usées contenant de l'amidon, du sable et une substance caustique	
Calcination de l'alumine	Hydrate d'aluminium	Particules et vapeur d'eau		
Fusion électrolytique de l'aluminium primaire	Alumine, anodes en carbone, cuves d'électrolyse, cryolithe	Fluorure — à la fois sous forme gazeuse et sous forme de particules —, dioxyde de carbone, dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , CF <sub>4</sub> et carbones perfluorés		Produits de l'usure des matières réfractaires

interdit, étant donné que la chaleur du métal en fusion fait fondre les fibres qui adhèrent à la peau, ce qui aggrave les brûlures.

Les personnes qui portent des stimulateurs cardiaques devraient être exclues des ateliers d'électrolyse en raison du risque de perturbation du rythme cardiaque par les champs magnétiques.

### Autres effets sur la santé

Les risques pour les travailleurs, la population générale et le milieu naturel résultant des émissions de gaz, de fumées et de poussières chargés de fluorures en raison de l'utilisation de fondant à base de cryolithe ont été abondamment décrits (voir tableau 82.4). Chez les enfants vivant à proximité d'usines d'aluminium mal protégées, on a observé, à des degrés divers, des taches sur la denture permanente, quand l'exposition se produisait au cours de la poussée de ces dents. Chez les fondeurs ayant travaillé avant 1950, ou dans des usines où les effluents contenant des fluorures restaient mal maîtrisés, on a observé des cas plus ou moins graves de fluorose des os. Le premier stade de cette affection se caractérise par un simple accroissement de la densité osseuse, particulièrement marqué dans les corps vertébraux et le bassin. A mesure que se poursuit l'absorption du fluorure dans les os, on constate une calcification des ligaments du bassin. Enfin, lors d'une d'exposition extrême et prolongée aux fluorures, il se produit une calcification des structures paraspinales et des autres ligaments, ainsi que des articulations. Si cette dernière phase a été observée sous sa forme sévère dans des usines où l'on traite la cryolithe, on ne l'a pratiquement jamais constatée chez les travailleurs des fonderies d'aluminium. Il semblerait que les moins sévères des modifications radiologiques des structures osseuses et ligamenteuses ne s'accompagnent pas d'altérations de la fonction architecturale ou métabolique des os. Moyennant une organisation satisfaisante du travail et une bonne ventilation, les travailleurs de ces ateliers peuvent être facilement prémunis contre l'apparition de l'une quelconque des évolutions radiologiques que l'on vient de décrire, et cela même chez des sujets ayant jusqu'à 25 à 40 ans d'ancienneté. Enfin, la mécanisation des opérations de fonderie devrait réduire au minimum, sinon éliminer totalement, tout risque lié aux fluorures.

Depuis le début des années quatre-vingt, on a apporté la preuve définitive qu'il existait chez les travailleurs des ateliers de fonderie d'aluminium une affection de type asthmatique. Cet asthme professionnel des fonderies d'aluminium qui se caractérise par une résistance variable au passage de l'air, avec ou sans hyperréaction bronchique, n'est pas précipité par les stimuli extérieurs au lieu de travail. Les symptômes cliniques, qui n'apparaissent généralement que plusieurs heures après l'exposition à l'atelier, sont le sifflement respiratoire, la constriction thoracique, l'essoufflement et une toux non productive. La période de latence entre le début de l'exposition et l'apparition de cette forme d'asthme professionnel est des plus variables (entre une semaine et dix ans), selon l'intensité et la nature de l'exposition. Il y a généralement amélioration lorsque le sujet s'éloigne quelque temps de son lieu de travail, pour les congés par exemple, mais les symptômes deviennent d'autant plus fréquents et graves que l'exposition sur les lieux de travail se prolonge. Bien que la manifestation de cette forme d'asthme ait pu être mise en corrélation avec les concentrations de fluorures dans les ateliers de fonderie, il n'est pas certain que son étiologie soit associée spécifiquement à l'exposition à cet agent chimique. Étant donné la nature complexe des mélanges de poussières, de fumées et de vapeurs (par exemple, fluorures à l'état particulaire et gazeux, dioxyde de soufre venant s'ajouter à de faibles concentrations d'oxydes de vanadium, de nickel et de chrome) présents dans les ateliers de fonderie, il est vraisemblable que les valeurs mesurées de fluorures sont en fait des témoins des concentrations de ces mélanges complexes.

Il semble bien que cette affection soit à rattacher à un groupe de plus en plus important de maladies professionnelles, à savoir

l'asthme professionnel. Le processus étiologique qui aboutit à cette affection est difficile à déterminer au cas par cas. La symptomatologie de l'asthme professionnel des fonderies d'aluminium peut relever de plusieurs causes: asthme allergique préexistant, hyperréaction bronchique non spécifique, syndrome réactif de dysfonctionnement des voies respiratoires ou asthme professionnel vrai. A l'heure actuelle, le diagnostic reste problématique, dans la mesure où il suppose des antécédents compatibles, la présence d'une limitation variable du passage de l'air ou, à défaut, la production d'une hyperréaction bronchique pharmacologiquement induite. En revanche, si cette dernière ne peut être démontrée, le diagnostic devient improbable (toutefois, il arrive que le phénomène se dissipe après disparition du trouble lorsque le travailleur est déplacé et n'est donc plus exposé).

Dans la mesure où le trouble tend à s'aggraver graduellement lorsque l'exposition est continue, on est amené, le plus souvent, à cesser d'exposer les individus concernés. S'il convient de tenir d'emblée les individus porteurs d'un asthme atopique préexistant éloignés des fonderies d'aluminium, l'absence d'atopie ne garantit nullement que le trouble ne se manifesterait pas en cas d'exposition professionnelle.

Des rapports donnent à penser que l'aluminium pourrait présenter une certaine neurotoxicité pour les travailleurs occupés à la fusion et au soudage de ce métal. On a pu apporter la preuve indubitable que l'aluminium est absorbé par les poumons et excrété dans l'urine à des niveaux supérieurs à la normale, notamment chez les travailleurs des ateliers d'électrolyse. Néanmoins, une bonne partie des travaux relatifs aux effets neurologiques observés chez ces travailleurs repose sur l'hypothèse que l'absorption de l'aluminium entraîne une neurotoxicité chez l'humain. Par conséquent, en attendant que cette corrélation ait pu être mise en évidence de façon mieux reproductible, le lien entre l'aluminium et la neurotoxicité professionnelle doit, jusqu'à plus ample information, être considéré comme hypothétique.

Étant donné que les travailleurs peuvent être obligés de fournir une dépense énergétique supérieure à 300 kcal/h lorsqu'ils doivent, par exemple, changer les anodes ou s'acquitter d'autres travaux pénibles à proximité des bains de cryolithe et d'aluminium en fusion, on peut observer, par temps chaud, des effets de coups de chaleur. C'est surtout avec l'apparition de vagues de forte chaleur humide que ces épisodes ont le plus de chances de se produire. En outre, des pratiques de travail qui imposent une accélération du rythme de travail pour le changement des anodes, ou le travail pendant deux postes successifs en périodes de grosses chaleurs, sont des facteurs aggravants. Les personnes mal acclimatées à la chaleur ou insuffisamment endurantes sur le plan physique, celles dont l'apport journalier en sel est insuffisant ou qui ont des pathologies récidivantes ou récentes, sont particulièrement exposées au risque de coups de chaleur ou de crampes de chaleur lorsqu'elles exécutent des travaux pénibles. Les coups de chaleur n'ont été que rarement observés chez les fondeurs d'aluminium, à l'exception de ceux qui présentaient un terrain pouvant y prédisposer (alcoolisme, vieillissement, par exemple).

On a pu démontrer que l'exposition aux composés aromatiques polycycliques par respiration de fumées et de particules de brai entraînait chez les travailleurs affectés aux cuves d'électrolyse du type Söderberg notamment un risque excédentaire de cancer de la vessie; ce surcroît de risque est amplement démontré. On estime que les travailleurs des ateliers de fabrication d'électrodes de carbone où l'on chauffe des mélanges de coke et de goudron sont eux aussi exposés à ce risque. Toutefois, lorsque les électrodes ont subi pendant plusieurs jours une cuisson à 1 200 °C environ, les composés aromatiques polycycliques sont à peu près complètement brûlés ou volatilisés et il ne subsiste plus d'exposition à ceux-ci au contact de ces anodes ou cathodes. Les cuves d'électrolyse faisant appel à des électrodes ayant subi une pré-cuisson devraient donc présenter

un risque moindre d'apparition de ces affections malignes. Des néoplasmes (leucémies autres que les myéloplastoses et cancer de l'encéphale) auraient été observés parmi les travailleurs affectés à l'électrolyse de l'aluminium. Cependant, les informations dont on dispose restent fragmentaires et conjecturales.

L'emploi du marteau-piqueur pneumatique pour briser la croûte de sel solidifié à la surface du bain produit à proximité des cuves d'électrolyse des niveaux sonores de l'ordre de 100 dBA. Les cuves d'électrolyse étant alimentées par un courant en série de faible tension et fort ampérage, les accidents par électrocution ne sont généralement pas sérieux. En revanche, dans la station électrique, au point où l'alimentation en courant à haute tension est raccordée au réseau série de la fonderie, des cas graves d'électrocution sont susceptibles de se produire, d'autant plus que l'on a affaire à du courant alternatif à haute tension.

Comme on s'est inquiété des risques que peut présenter l'exposition aux champs électromagnétiques, l'exposition des travailleurs de ce secteur industriel fait l'objet d'études. On sait que les cuves d'électrolyse sont alimentées en courant continu; il en résulte que les champs électromagnétiques créés dans ces installations sont principalement du type statique ou stationnaire. Moins encore que dans le cas des champs électromagnétiques basse fréquence, il n'a été possible d'apporter la preuve que ces champs pouvaient exercer des effets biologiques systématiques ou reproductibles, que ce soit expérimentalement ou cliniquement. De plus, on observe que les niveaux de flux des champs magnétiques mesurés dans les cuves d'électrolyse modernes sont habituellement compris en deçà des seuils limites d'exposition actuellement proposés à titre provisoire pour les champs magnétiques statiques, les champs dont les fréquences sont inférieures aux fréquences radioélectriques et les champs électriques statiques. Il y a également exposition aux champs électromagnétiques à ultrabasse fréquence dans les installations d'électrolyse, notamment aux extrémités des salles contiguës aux postes de redressement. Cependant, les niveaux de flux observés à proximité des cuves sont minimes, largement inférieurs aux normes actuelles. En résumé, il n'a pas été possible de prouver de façon convaincante l'existence d'effets nocifs réguliers et reproductibles des champs électromagnétiques dans les usines d'aluminium.

### La fabrication des électrodes

Les travailleurs au contact de vapeurs de brai peuvent développer un érythème; l'exposition à la lumière solaire est à l'origine d'une photosensibilisation qui accroît l'irritation. Des cas de tumeurs cutanées localisées ont été signalés chez des travailleurs affectés à la fabrication des électrodes en carbone dont l'hygiène individuelle était insuffisante; après excision et mutation à un autre poste de travail, il n'a généralement été constaté ni propagation de la tumeur ni récurrence. La fabrication des électrodes produit parfois des quantités considérables de poussières de carbone et de brai. Lorsque ces expositions aux poussières étaient massives et mal maîtrisées, on a pu observer chez les travailleurs affectés à la fabrication des électrodes de carbone des cas occasionnels de pneumoconiose simple avec emphysème focal et complication de lésions fibrotiques massives. Ces pneumoconioses, qu'elles soient simples ou accompagnées de complications, ne se distinguent pas de celles rencontrées chez les mineurs de charbon. Enfin, pour ce qui est du bruit, le broyage du coke dans les broyeurs à boulets engendre des niveaux sonores pouvant atteindre 100 dBA.

*Note du rédacteur:* le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé l'industrie de l'aluminium comme source de cancers humains du groupe I. Diverses expositions ont pu être associées à d'autres affections (par exemple, «l'asthme des fonderies») décrites dans d'autres parties de l'*Encyclopédie*.

## LA FUSION ET L'AFFINAGE DE L'OR

I.D. Gadaskina et L.A. Ryzik\*

L'extraction de l'or est pratiquée à petite échelle par des chercheurs d'or (en Chine et au Brésil, par exemple) et à grande échelle dans des mines souterraines (en Afrique du Sud, par exemple) ou à ciel ouvert (aux États-Unis, notamment).

La façon la plus simple d'extraire l'or consiste à remplir de sable ou de gravier aurifère un récipient peu profond appelé batée, de le présenter sous un courant d'eau et de lui imprimer un mouvement de rotation. Le sable et le gravier, plus légers, sont peu à peu emportés par l'eau, ne laissant plus vers le centre de la batée que les particules d'or. Une technique d'extraction hydraulique moins rudimentaire consiste à diriger un puissant jet d'eau contre le gravier ou le sable aurifère. Le matériel aurifère se désagrège et est entraîné à travers des vannes spéciales où se dépose l'or, tandis que le gravier plus léger est emporté par flottation. Pour l'extraction en rivière, on fait appel à des dragues à godets, bateaux à fond plat équipés d'une chaîne à godets qui prélève le matériau au fond de la rivière et le déverse dans un trommel-déboureur. Le matériau subit une rotation dans ce crible à tambour auquel on applique de l'eau. Le sable aurifère passe à travers les perforations du crible et tombe sur des tables à secousses où il subit une nouvelle concentration.

Les deux méthodes principales d'extraction de l'or à partir de ses minerais sont l'amalgamation et la cyanuration. Le procédé de l'amalgamation repose sur la propriété que possède l'or de s'allier au mercure métallique pour former des amalgames de consistance variable, depuis l'état solide jusqu'à l'état liquide. L'or s'extrait assez facilement de l'amalgame par distillation du mercure. Dans l'amalgamation interne, l'or est séparé au stade même de la pulvérisation du minerai, à l'intérieur du broyeur. L'amalgame extrait de l'appareil est lavé à l'eau dans des coupelles spéciales pour le débarrasser de ses impuretés. On extrait ensuite l'excès de mercure par pressage. Dans l'amalgamation externe, la séparation de l'or s'opère à l'extérieur du broyeur, dans des amalgamateurs ou «sluices» (canaux inclinés recouverts de feuille de cuivre). Avant de retirer l'amalgame, on rajoute du mercure. L'amalgame purifié et lavé est ensuite pressé. Dans les deux cas, le mercure est séparé de l'amalgame par distillation. Le procédé de l'amalgamation n'est que rarement utilisé de nos jours, sauf dans de petites exploitations, en raison des problèmes d'environnement que pose ce mode opératoire.

L'extraction par cyanuration utilise la propriété que possède l'or de donner un sel double, soluble dans l'eau et stable, de formule  $\text{KAu}(\text{CN})_2$  lorsqu'il est associé au cyanure de potassium en présence d'oxygène. La pulpe résultant de la pulvérisation du minerai se compose de grandes particules cristallines, les sables, et de petites particules amorphes, appelées boues. Les sables, plus lourds, se déposent au bas de l'appareil et laissent passer les solutions, y compris les boues. Le procédé d'extraction de l'or consiste à déverser le minerai qui se présente, après broyage, sous la forme d'un sable fin, dans une cuve de lixiviation et à laisser filtrer à travers la couche une solution de cyanure de potassium ou de sodium. On sépare les boues des solutions de cyanure en ajoutant des épaississants et en les faisant passer dans des filtres à vide. La lixiviation en tas, au cours de laquelle la solution de cyanure est versée sur un tas nivelé de minerai grossièrement

\* D'après la 3<sup>e</sup> édition de l'*Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*.

broyé est de plus en plus utilisée, surtout lorsqu'on a affaire à des minerais pauvres et à des résidus. Dans les deux cas, on récupère l'or à partir de la solution de cyanure en ajoutant de la poudre d'aluminium ou de zinc. Par une opération séparée, qui consiste à attaquer la solution aurifère par l'acide concentré, on recueille finalement de l'or massif.

Au contact de l'acide carbonique, de l'eau et de l'air, ainsi que des acides présents dans le minerai, les solutions de cyanure se décomposent avec dégagement d'acide cyanhydrique. Pour éviter cet effet, on ajoute une matière basique (chaux ou soude caustique). Il y a aussi libération de cyanure d'hydrogène lorsqu'on ajoute de l'acide pour dissoudre l'aluminium ou le zinc.

Une autre technique de cyanuration fait appel au charbon activé pour extraire l'or. On ajoute des épaississants à la solution de cyanure d'or avant de mélanger celle-ci avec du charbon activé pour produire une suspension. Le charbon contenant de l'or est séparé par tamisage, et l'or est extrait au moyen de cyanure alcalin concentré en solution alcoolique. L'or est ensuite récupéré par électrolyse. On peut réactiver le charbon par grillage et récupérer le cyanure pour le réemployer.

L'amalgamation comme la cyanuration donnent un métal qui contient une forte proportion d'impuretés; la teneur en or pur excède rarement 900% et il est nécessaire de soumettre le métal à un nouvel affinage par un procédé électrolytique pour atteindre des teneurs égales ou supérieures à 999,8%.

L'or est également obtenu comme sous-produit de la fusion du cuivre, du plomb et d'autres métaux (voir au présent chapitre l'article «La fusion et l'affinage du cuivre, du plomb et du zinc»).

### Les risques et leur prévention

Les minerais aurifères des gisements à grande profondeur sont extraits dans des mines souterraines. Dans ces exploitations, des mesures doivent être prises pour empêcher la formation et la propagation de poussières dans les galeries. La séparation de l'or des minerais arsenicaux est une cause d'exposition des mineurs à l'arsenic et de pollution de l'air et des sols par des poussières contenant de l'arsenic.

Dans le procédé d'extraction de l'or par le mercure, les travailleurs sont exposés à de fortes concentrations atmosphériques de mercure libérées lors du dépôt de la manipulation de l'amalgame sur les sluices, lorsqu'il est épuré ou pressé et pendant la distillation du mercure. Des cas d'intoxication mercurielle sont attestés chez les travailleurs affectés aux opérations d'amalgamation et de distillation. Le risque d'exposition au mercure lors des opérations d'amalgamation est devenu un problème sérieux dans plusieurs pays d'Extrême-Orient et d'Amérique du Sud.

S'agissant des procédés d'amalgamation, le mercure doit être déposé sur les sluices et l'amalgame recueilli de telle manière que le mercure n'entre pas en contact avec la peau des mains (on utilise pour cela des pelles à long manche, des vêtements protecteurs résistants au mercure, etc.). La manipulation de l'amalgame et l'élimination ou le pressage du mercure doivent être des opérations le plus possible mécanisées, sans qu'il puisse y avoir contact des mains avec le mercure; le traitement de l'amalgame et la distillation du mercure doivent se faire dans des locaux séparés et isolés dont les parois, les plafonds, les sols, l'appareillage et les surfaces de travail sont recouverts de matériaux n'absorbant pas le mercure ou ses vapeurs; les surfaces seront régulièrement nettoyées de manière à éliminer toute trace de mercure. L'ensemble des locaux où ont lieu des opérations mettant en œuvre du mercure doivent être équipés de systèmes de ventilation générale et de ventilation avec aspiration localisée. L'efficacité de ces systèmes doit être particulièrement élevée dans les locaux de distillation. Le mercure doit être stocké dans des récipients métalliques à fermeture hermétique, placés sous une hotte d'aspiration spéciale; les travailleurs doivent recevoir un équipement de protection indivi-

duelle adapté au travail avec le mercure; enfin, l'air des locaux réservés à l'amalgamation et à la distillation fera l'objet d'analyses systématiques. En outre, une surveillance médicale devrait être prévue.

La contamination de l'air des ateliers de cyanuration par le cyanure d'hydrogène dépend de la température ambiante, de la ventilation, du volume de matériau traité, de la concentration des solutions de cyanure, de la qualité des réactifs et du nombre d'installations non protégées. L'examen médical des travailleurs des usines de récupération d'or a permis d'identifier des symptômes d'intoxication chronique par le cyanure d'hydrogène, sans préjudice d'une fréquence élevée de dermatites allergiques, d'eczéma et de pyodermite (maladie inflammatoire aiguë de la peau avec formation de pus).

Une bonne organisation des travaux de préparation des solutions de cyanure est particulièrement importante. Si les opérations d'ouverture des fûts contenant les sels de cyanure et de transfert de ces sels dans les cuves de dissolution ne sont pas mécanisées, il peut y avoir contamination non négligeable par des poussières de cyanure et du cyanure d'hydrogène à l'état gazeux. Les solutions de cyanure devraient être transférées au moyen de systèmes hermétiquement clos, à l'aide de pompes volumétriques automatiques. Dans les installations de cyanuration de l'or, le degré voulu d'alcalinité doit être maintenu dans tous les appareillages de cyanuration; en outre, ces derniers doivent être hermétiquement clos et équipés d'un système de ventilation avec aspiration localisée, associé à des moyens généraux d'aération et de surveillance des fuites. Tous ces appareils, ainsi que les parois, sols, zones non protégées et escaliers doivent être recouverts de matériaux non poreux et régulièrement nettoyés au moyen de solutions légèrement alcalines.

Le recours aux acides pour attaquer les copeaux de zinc lors du traitement des boues peut donner lieu à un dégagement de cyanure d'hydrogène et d'arsine. Ces opérations doivent par conséquent être exécutées dans des locaux séparés, spécialement équipés, avec hottes aspirantes.

Il devrait être interdit de fumer et des locaux séparés devraient être mis à la disposition des travailleurs pour leur permettre de prendre leurs repas et de consommer des boissons. L'équipement de premiers soins, disponible en permanence, devrait comprendre les substances nécessaires à l'élimination immédiate des solutions de cyanure étant entrées en contact avec la peau, ainsi que des antidotes contre l'intoxication cyanurée. Les travailleurs doivent être équipés de vêtements protecteurs étanches aux composés du cyanure.

### Les effets environnementaux

Des études ont prouvé l'exposition aux vapeurs de mercure métallique et la méthylation du mercure dans la nature, en particulier à proximité des installations de traitement de l'or. Lors d'une étude concernant l'eau, les sédiments et les poissons conduite au Brésil dans le voisinage de mines d'or, les concentrations de mercure dans les parties comestibles des poissons consommés localement dépassaient de près de six fois la concentration indicative brésilienne pour la consommation humaine (Palheta et Taylor, 1995). Dans une zone contaminée du Venezuela, des chercheurs d'or utilisent depuis des années le mercure pour séparer l'or des sables et des poussières aurifères. La concentration de mercure dans le sol superficiel et les sédiments caoutchouteux de la zone contaminée est si élevée qu'elle représente un risque sérieux sur le plan professionnel et celui de la santé publique.

La contamination des eaux usées par le cyanure n'est pas moins préoccupante. Les solutions de cyanure devraient être traitées avant rejet ou être récupérées et réutilisées. A titre d'exemple, les effluents gazeux contenant du cyanure d'hydrogène passent par un laveur avant d'être rejetés dans l'atmosphère.

## LES FONDERIES

*Franklin E. Mirer*

Les opérations de fonderie, ou de coulée des métaux, consistent à couler du métal en fusion à l'intérieur d'un moule réfractaire creux qui reproduit la forme extérieure ou négative du modèle de l'objet métallique à fabriquer. Le moule pourra contenir un noyau correspondant aux éventuels évidements de la pièce moulée définitive. Le travail de fonderie comprend les opérations ci-après :

- la préparation du modèle de la pièce que l'on veut fabriquer;
- la fabrication du moule et des noyaux et l'assemblage du moule;
- la fusion et l'affinage du métal;
- la coulée du métal dans le moule;
- le refroidissement de la pièce moulée;
- le démoulage et le dénoyautage (décochage);
- le dessablage et l'ébarbage.

Si les principes de base des travaux de fonderie n'ont guère varié pendant des milliers d'années, les procédés de fabrication ont été de plus en plus mécanisés et automatisés. Le métal et le plastique ont remplacé le bois pour la préparation des modèles, de nouveaux matériaux sont apparus pour la fabrication des noyaux et des moules, tandis que le nombre d'alliages moulés est de plus en plus large. Le procédé de fonderie le plus courant est le moulage en sable de la fonte de fer.

Les principaux métaux traditionnellement utilisés en fonderie sont le *fer*, l'*acier*, le *laiton* et le *bronze*. Ce sont les fontes grises et les fontes ductiles qui dominent l'industrie de la fonderie. Les fonderies de fonte grise utilisent du fer ou de la fonte en gueuse (lingots neufs) pour fabriquer des pièces moulées standards. Les fonderies de fer ductile ajoutent du magnésium, du cérium ou d'autres additifs aux poches de métal en fusion avant la coulée, pour obtenir des pièces de fonte nodulaire ou malléable. Les différents additifs n'ont que peu d'incidence sur l'exposition professionnelle des travailleurs. L'acier et le fer malléable représentent le solde de la branche de la fonderie des métaux ferreux. Les principaux clients des grandes fonderies sont l'industrie automobile, le bâtiment et l'industrie du machinisme agricole. L'emploi en fonderie de fer a régressé dans la mesure où les blocs moteurs sont aujourd'hui plus petits et peuvent être coulés dans un seul moule, et aussi parce que l'aluminium tend à remplacer la fonte. Les fonderies de métaux non ferreux, notamment les fonderies d'aluminium et les ateliers de moulage sous pression, ont des effectifs très nombreux. Les fonderies de laiton, qu'il s'agisse de fonderies spécialisées ou de fonderies produisant pour l'industrie des appareils sanitaires, sont un secteur en régression, mais qui reste important dans l'optique de la santé au travail. Depuis quelques années, le titane, le chrome, le nickel et le magnésium, ainsi que des métaux plus toxiques encore tels que le béryllium, le cadmium et le thorium sont venus s'ajouter à ceux utilisés en fonderie.

Bien que la fonderie soit à proprement parler une opération de refusion aboutissant à la production de lingots et de gueuses, l'intégration des grandes unités sidérurgiques est si poussée que la distinction n'apparaît plus guère. C'est ainsi qu'un haut-fourneau peut produire exclusivement de la fonte commerciale, mais que, dans une usine intégrée, la production du haut-fourneau peut, en partie, être utilisée à l'état fondu pour réaliser des pièces coulées, ce qui est en réalité une opération de fonderie, tandis qu'une autre fraction est prélevée à l'état liquide pour être transformée en acier. Le lingotage est traité, en fait, comme un secteur distinct de

la sidérurgie. Dans une fonderie ordinaire, la refusion de la fonte est aussi une opération d'affinage. Dans les fonderies de métaux non ferreux, l'opération de fusion comporte parfois l'adjonction de métaux et d'autres substances; il s'agit alors de production d'alliage.

Les moules fabriqués avec des sables siliceux alliés à de l'argile jouent aujourd'hui un rôle prédominant dans le secteur de la fonderie. Les noyaux traditionnellement obtenus par cuisson de sable siliceux allié à des huiles végétales ou à des résidus de sucrerie ont en grande partie disparu. De nouvelles techniques de fonderie ont été mises au point pour la fabrication des moules et des noyaux.

En règle générale, les risques encourus dans les fonderies en matière de sécurité et de santé peuvent être classés par type de métal coulé, procédé de moulage, dimension des ouvrages en fonte et degré de mécanisation.

### Les procédés

A partir des épures fournies par le bureau d'études, on construit un modèle qui reproduit la forme extérieure de la pièce finie que l'on souhaite fabriquer. De la même manière, on construira une boîte à noyaux qui permettra d'obtenir des noyaux qui imposeront à la pièce sa configuration interne. Les noyaux sont le plus souvent faits en sable et comprimés dans des boîtes creuses ayant la forme souhaitée, mais d'autres techniques existent. C'est le cas du moulage en coquille, qui fait appel à des moules en fonte ou en acier; du moulage sous pression dans lequel le métal en fusion, souvent un alliage léger, est refoulé dans un moule métallique à des pressions comprises entre 70 et 7 000 kgf/cm<sup>2</sup>; et du moulage à cire perdue, consistant à reproduire en cire le modèle de chaque pièce, ce modèle étant ensuite recouvert d'un revêtement en matériau réfractaire qui constitue le moule proprement dit. Quant au procédé à «mousse perdue», il utilise des modèles en mousse de polystyrène dans le sable pour le moulage de pièces en aluminium.

Les métaux et les alliages sont préparés et portés à fusion dans un four du type cubilot, ou dans un four rotatif, à réverbère, à creuset, à arc, à canal ou à induction sans noyau (voir tableau 82.5). Après avoir procédé aux analyses métallurgiques ou chimiques nécessaires, on verse le métal en fusion dans le moule assemblé soit avec une poche, soit par coulée directe. Une fois le métal refroidi, on enlève le moule et les noyaux (décochage ou déboîtage), puis la pièce coulée est dégrossie et nettoyée (ébarbage, grenailage ou dessablage hydraulique et autres techniques abrasives). Certaines pièces coulées devront ensuite être soudées, être soumises à un traitement thermique ou être peintes, conformément aux spécifications du client.

Les risques associés à la présence de métal brûlant sont communs à la plupart des fonderies, quel que soit le procédé utilisé. Toutefois, certains risques sont spécifiques à un procédé de fonderie particulier. C'est ainsi que l'emploi du magnésium présente des risques d'effet de torche, que l'on ne retrouve pas dans les autres branches de la métallurgie. Le présent article traite en premier lieu des fonderies de fonte, où l'on rencontre la plupart des risques inhérents à la fonderie.

La fonderie industrielle, ou mécanisée, fait appel aux mêmes méthodes que la fonderie classique. Les machines à mouler et les appareils de grenailage ou de dessablage hydraulique sont généralement pourvus de dispositifs intégrés de dépoussiérage. Toutefois, comme le sable est souvent déplacé sur un transporteur à bande ouvert, les points de transfert et le sable répandu peuvent libérer dans l'air des quantités de poussières considérables, parfois même plus importantes que dans une fonderie classique du fait des cadences plus rapides. Une étude exécutée à partir des données de prélève-

Tableau 82.5 • Appareils de fusion

Four	Description
Cubilot	Un cubilot est un four vertical, haut de plusieurs mètres, ouvert à la partie supérieure et muni de portes montées sur charnières au fond. On le charge par le haut de couches alternées de coke, de castine et de ferrailles; le métal en fusion est recueilli à la partie inférieure. Les risques particuliers sont ceux du monoxyde de carbone et de la chaleur
Four électrique à arc	On charge le four de lingots, de ferrailles, de métaux d'alliage et de fondants. Il se produit un arc entre les trois électrodes et la charge, ce qui cause la fusion du métal. On recouvre la surface du métal en fusion d'un laitier additionné de fondants pour empêcher l'oxydation, affiner le métal et protéger la voûte de la chaleur excessive. Une fois l'opération terminée, les électrodes sont relevées et le four est basculé pour verser le métal en fusion dans la poche de coulée. Les principaux risques sont ceux des fumées métalliques et du bruit
Four à induction	Avec le four à induction, la fusion du métal s'opère par le passage d'un fort courant électrique dans une bobine constituée d'un tube de cuivre placée à l'extérieur du four, ce qui induit un courant électrique à l'extérieur de la charge, d'où échauffement du métal compte tenu de la forte résistance électrique de cette dernière. La fusion s'opère de l'extérieur vers l'intérieur de la charge. Les principaux risques sont ceux des fumées métalliques
Four à creuset	Le creuset qui contient la charge est chauffé au moyen d'un brûleur à gaz ou au mazout. Lorsque l'opération est terminée, le creuset est saisi et extrait du four pour la coulée. Les principaux risques sont ceux du monoxyde de carbone, des fumées métalliques, du bruit et de la chaleur
Four rotatif	Four cylindrique rotatif, incliné, que l'on charge par le haut et dont le foyer se trouve à l'extrémité inférieure
Four à canal	Type de four à induction
Four à réverbère	Ce four horizontal se compose d'un foyer à l'une des extrémités, séparé de la charge par une cloison basse appelée autel, et d'une cheminée à l'autre extrémité. Il n'y a pas de contact entre le métal et le combustible solide. Le foyer et la charge sont recouverts d'une voûte. En se déplaçant du foyer vers la cheminée, les flammes sont renvoyées sur le métal par rayonnement ou réverbération, ce qui cause sa fusion

ment de l'air au milieu des années soixante-dix a révélé des concentrations de poussières plus élevées dans les grandes unités de production américaines que dans les petites fonderies contrôlées à la même époque. L'installation de hottes aspirantes au-dessus des points de transfert des bandes transporteuses, jointe à une scrupuleuse propreté, devrait être de règle. Le transport par système pneumatique, parfois applicable du point de vue économique, permet de travailler dans une atmosphère pratiquement exempte de poussières.

### Les fonderies de fonte

Pour plus de commodité, on supposera qu'une fonderie de fonte comporte les six étapes ci-après:

1. la fusion et la coulée;
2. la préparation des modèles;
3. le moulage (fabrication des moules);
4. le noyautage;
5. le décochage/débouillage;
6. le nettoyage des pièces moulées.

Dans de nombreuses fonderies, la plupart de ces procédés sont mis en œuvre simultanément ou consécutivement dans le même atelier.

Dans une fonderie industrielle typique, le fer passe par les étapes de la fusion, de la coulée, du refroidissement, du décochage, du nettoyage et de l'expédition des pièces finies. Quant au sable, il passe par les stades du mélange, du moulage, du décochage et du mélange à nouveau. Le sable entre dans le processus au stade de la confection du noyau, laquelle commence avec du sable neuf.

### La fusion et la coulée

En fonderie, les fours de type cubilot sont largement employés pour la fusion et l'affinage du métal. Le cubilot est un haut four vertical, ouvert à la partie supérieure et doté en bas de portes mobiles, avec garnissage réfractaire intérieur; on le charge de coke, de ferrailles et de castine. Il comporte, à la base, des tuyères ou orifices d'amenée du vent nécessaires à la combustion du coke qui sert à chauffer, à fondre et à purifier le fer. Les charges sont introduites par le haut, par un orifice de chargement appelé gueulard, au moyen d'une grue ou d'un pont roulant; elles doivent être stockées à proximité, généralement sur des parcs ou dans des trémies situés dans la cour adjacente à la machine de chargement. Le bon ordre et la surveillance des tas de matières premières sont indispensables si l'on veut éviter les accidents provoqués par des chutes d'objets lourds. Pour réduire les ferrailles à la taille voulue pour le chargement du four et des trémies de stockage, on utilise souvent une masse de démolition ou un gros électroaimant suspendus à une grue ou à un pont roulant. La cabine de la grue ou du pont roulant devrait être convenablement protégée et le grutier, ou le pontier, avoir reçu la formation appropriée.

Les travailleurs chargés de la manutention des matières premières devraient porter des gants de cuir et des chaussures de sécurité. Si le personnel n'est pas attentif, la trémie peut déborder, ce qui est dangereux. Si les opérations de chargement sont trop bruyantes, on peut réduire le niveau sonore résultant de l'impact métal sur métal en équipant berlines et bennes de garnitures en caoutchouc. La plate-forme de chargement, nécessairement située en position haute, peut être dangereuse si elle n'est pas parfaitement plane, si sa surface n'est pas antidérapante et si elle n'est pas entourée, ainsi que les ouvertures éventuellement ménagées dans son plancher, de solides garde-corps.

Le cubilot dégage de grandes quantités de monoxyde de carbone qui peut s'échapper par la porte de chargement ou être rabattu par le vent. Le monoxyde de carbone, incolore et inodore, peut rapidement atteindre des niveaux ambiants toxiques. Les travailleurs se trouvant sur la plate-forme de chargement ou la passerelle devraient savoir reconnaître les symptômes d'intoxication au monoxyde de carbone. Une surveillance à la fois régulière et ponctuelle des niveaux d'exposition s'impose. Des appareils de protection respiratoire autonomes et du matériel de réanimation devraient être prêts à l'emploi, et les travailleurs devraient savoir s'en servir. En cas de travaux réalisés en urgence, un système de surveillance des contaminants lors de l'accès aux espaces confinés devrait être mis en place et rigoureusement appliqué. Tous les travaux devraient s'effectuer sous surveillance.

Les cubilots sont généralement installés par paires ou en groupes afin que, lorsque l'un de ceux-ci est en réparation, les autres puissent fonctionner. La durée d'utilisation dépend de la durabilité des réfractaires et des recommandations des ingénieurs. On doit établir à l'avance des procédures pour l'évacuation de la fonte brute et pour l'arrêt de l'installation en cas d'apparition de points chauds ou de défaillance du système de refroidissement par eau. La réparation des cubilots implique nécessairement la présence de travailleurs à l'intérieur de la cuve du cubilot pour réparer ou remplacer la garniture réfractaire. Ces tâches devraient être considérées comme travaux en espace confiné et, à ce titre, faire l'objet de précautions particulières. Lorsque des travailleurs inter-

viennent dans le cubilot, on devrait également veiller à éviter que des matières ne tombent par les portes de chargement. Pour se protéger des chutes d'objets, les travailleurs devraient porter des casques de protection et, s'ils travaillent en hauteur, des harnais de sécurité.

Les cubilotiers (chargés de faire passer le métal en fusion du creuset du cubilot vers un four d'attente ou une poche) doivent observer des mesures de protection individuelle extrêmement rigoureuses. Le port de lunettes spéciales et de vêtements protecteurs est impératif. Les lunettes de protection devraient résister à la fois à des chocs violents et aux projections de métal en fusion. Toutes les précautions devraient être prises pour éviter que le laitier flottant (déchets extraits du métal en fusion par addition de calcine) et du métal entrent en contact avec de l'eau, ce qui causerait une explosion de vapeur. L'ouvrier de coulée et le contremaître doivent veiller à ce qu'aucune personne étrangère au service ne pénètre dans la zone dangereuse, délimitée par un cercle d'un rayon d'environ 4 m à partir du creuset. La délimitation d'une zone d'interdiction est rendue obligatoire par le règlement de 1953 de la sidérurgie britannique (British Iron and Steel Foundries Regulations).

Lorsque la fusion est terminée, on procède au défournage du cubilot, c'est-à-dire qu'on ouvre le fond mobile pour retirer les scories et autres matériaux indésirables se trouvant encore à l'intérieur de la cuve; après la vidange, le cubilot est laissé à refroidir en attendant que les travailleurs puissent procéder aux opérations d'entretien de la garniture réfractaire. Ouvrir le fond du cubilot est une opération dangereuse qui demande beaucoup de dextérité et un encadrement expérimenté. Le cubilot doit être vidé sur un sol réfractaire ou sur une couche de sable sec. En cas d'incident (par exemple, un fond de cubilot bloqué), il convient de prendre de grandes précautions pour éviter que les projections de métal et de laitier brûlants ne causent des brûlures aux fondeurs.

Le métal chauffé à blanc, d'autre part, émet un rayonnement infrarouge et ultraviolet dangereux pour les yeux, susceptible de causer une cataracte en cas d'exposition prolongée.

Avant de la remplir de métal en fusion, on procède au séchage de la poche pour empêcher les explosions de vapeur d'eau; pour cela, il faut prévoir un flambage d'une durée suffisante.

Les cubilotiers devraient être équipés de casques de sécurité, de lunettes teintées de protection et d'écrans pour le visage, ainsi que de vêtements aluminés tels que tabliers, guêtres (ou demi-guêtres) et chaussures de sécurité. Le port de l'équipement de protection devrait être obligatoire et les travailleurs devraient apprendre à l'utiliser et à l'entretenir. L'ordre le plus rigoureux doit régner partout où l'on manipule du métal en fusion; la présence d'eau sur les lieux sera strictement bannie.

Lorsque les poches de coulée sont suspendues à des grues ou à des ponts roulants, on devrait recourir à des dispositifs de sécurité pour empêcher le déversement du métal lorsque le travailleur chargé de la manœuvre lâche prise. Pour empêcher tout accident, les crochets auxquels sont suspendues les poches de métal en fusion doivent faire l'objet d'essais périodiques destinés à déceler toute fatigue du métal.

Dans les grandes fonderies industrielles, le moule, une fois assemblé, est dirigé au moyen d'un transporteur mécanique jusqu'au poste de coulée. La coulée peut se faire à partir d'une poche manœuvrée manuellement à l'aide d'un volant ou d'une poche de transfert commandée depuis une cabine; elle peut aussi être automatique. Le poste de coulée est généralement doté d'une hotte compensatrice directement alimentée en air. Une fois rempli, le moule passe sur le transporteur à travers un tunnel de refroidissement à extracteur d'air, pour être acheminé jusqu'au décochage. Dans les petits ateliers de fonderie, les moules sont parfois remplis à même le sol de la fonderie où on les laisse refroidir. Dans ce cas, la poche devrait être équipée d'une hotte aspirante mobile.

La coulée, le transport du fer en fusion et le chargement des fours électriques sont des causes d'exposition à l'oxyde de fer et autres fumées métalliques d'oxydes. La coulée dans le moule enflamme et pyrolyse les matières organiques de celui-ci, ce qui dégage de grandes quantités de monoxyde de carbone, de fumées, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques cancérigènes, ainsi que des produits de pyrolyse émanant des noyaux, lesquels peuvent être cancérigènes et agir comme sensibilisateurs respiratoires. Les moules qui contiennent des noyaux à boîte froide de grande taille, liés au polyuréthane, dégagent une intense fumée irritante qui contient des isocyanates et des amines. Ici, la première précaution à prendre est de prévoir un poste de coulée avec une installation d'aspiration localisée et un tunnel de refroidissement.

Dans les fonderies dont les toitures sont munies de ventilateurs destinés à extraire les vapeurs dégagées par les opérations de coulée, on peut trouver des concentrations élevées de fumées métalliques aux points hauts, par exemple dans les cabines de grue ou de pont roulant. Si celles-ci sont occupées par un opérateur, elles devraient être fermées et dotées d'un système de filtrage et de conditionnement d'air.

### *La préparation des modèles*

La préparation des modèles est une tâche très qualifiée qui consiste à traduire en un objet en trois dimensions une épure en deux dimensions. Les modèles en bois traditionnels sont réalisés dans un atelier de modelage contenant de l'outillage à main, des scies à ruban et des dégauchisseuses. Toutes les mesures raisonnablement envisageables devraient être prises pour abaisser au minimum le niveau sonore et mettre à la disposition du personnel des protections de l'ouïe. Il est important que les travailleurs comprennent que le port de ces protections est de leur intérêt.

Les scies à ruban et les dégauchisseuses électriques présentent des dangers évidents; or, bien souvent, on ne peut pas les équiper de protecteur sans empêcher leur fonctionnement. Les travailleurs doivent donc connaître parfaitement l'utilisation de ces machines et être avertis des dangers qu'elles comportent.

Le sciage du bois cause une exposition aux poussières de bois. Des systèmes efficaces de ventilation devraient être mis en place pour les extraire de l'air de l'atelier de modelage. Dans certaines industries qui utilisent des bois de feuillus, des cas de cancer du nez ont été observés. Le problème n'a pas été étudié en fonderie.

La coulée en moules métalliques permanents (coquilles), comme la coulée sous pression, représente une évolution importante de l'industrie de la fonderie. Dans ce cas, la préparation du modèle est largement remplacée par des opérations mécaniques et se ramène en fait à une opération de fabrication de matrices. La plupart des risques liés à la préparation des modèles et à l'emploi du sable sont éliminés, mais ils sont remplacés par le risque inhérent à l'emploi de certains matériaux réfractaires destinés au revêtement de la matrice ou du moule. La fonderie sous pression moderne fait de plus en plus couramment usage de noyaux en sable, auquel cas les risques de la fonderie en sable, à savoir l'exposition aux poussières, demeurent.

### *Le moulage*

En fonderie de fonte, la technique de moulage la plus répandue est le moulage en sable vert, basé sur l'emploi de sable siliceux, de poussier de houille, d'argile et de liants organiques. D'autres méthodes de préparation des moules s'inspirent du noyautage: therm durcissement, autodurcissement à froid et durcissement au gaz. Ces méthodes et les risques qu'elles comportent sont développés à la rubrique «Le noyautage», ci-après. On peut également faire appel aux moules permanents ou au procédé à mousse perdue, surtout en fonderie d'aluminium.

Dans les fonderies industrielles, le mélange des sables, le moulage, l'assemblage des moules, la coulée et le décochage sont

intégrés et mécanisés. Le sable revenant du décochage est recyclé et renvoyé aux installations de mélange des sables où, après adjonction d'eau et d'autres additifs, on mélange les sables dans un broyeur pour obtenir les propriétés physiques voulues.

Pour la commodité de l'assemblage, les modèles (et les moules correspondants) sont réalisés en deux parties. Dans le cas du moulage manuel, les moules sont enfermés dans des cadres métalliques ou en bois appelés *châssis*. La moitié inférieure du modèle est placée dans la partie inférieure du châssis (*dessous*) et l'on commence par verser du sable fin, puis du sable plus gros autour du modèle. Le sable est tassé dans le moule au moyen d'un compacteur vibrant, d'une machine de moulage par projection ou par d'autres moyens. Le *dessus* du châssis est établi de la même manière. On dispose des mandrins en bois dans le dessus pour former les trous de coulée par lesquels le métal en fusion pénètre dans la cavité du moule et les évents. On retire les modèles, on introduit le noyau, puis les deux moitiés du moule sont assemblées et clavetées, prêtes pour la coulée. Dans les fonderies industrielles, le dessus et le dessous du châssis sont préparés sur un transporteur mécanique, les noyaux disposés dans le dessous et le moule assemblé par des moyens mécaniques.

Dès lors que l'on manipule du sable se pose le problème de la silice. Mais, dans la mesure où le sable de moulage est généralement soit humide, soit mélangé à de la résine liquide, il y a moins de chances qu'il soit une source importante de poussières respirables. On ajoute parfois un agent de démoulage tel que le talc pour faciliter la séparation du modèle et du moule. Le talc respirable est responsable d'un type de pneumoconiose, la talcose. Les agents de démoulage sont plus fréquemment employés lorsque le moulage est manuel; on ne les observe que rarement dans les grandes installations, plus automatisées. Il arrive que l'on pulvérise des substances chimiques sur la surface des moules, en suspension ou dissoutes dans l'alcool isopropylique, lesquelles sont ensuite brûlées pour laisser un enduit — de graphite le plus souvent — à la surface du moule pour donner à l'objet moulé un plus beau fini. Cette opération comportant un risque d'incendie, tous les travailleurs appelés à manipuler ces substances devraient être équipés de vêtements protecteurs ignifugés, ainsi que d'une protection pour les mains, étant donné que les solvants organiques peuvent provoquer une dermatite. Les revêtements devraient être appliqués dans une cabine bien ventilée afin d'empêcher les vapeurs organiques de se répandre dans l'atelier. Le stockage et l'emploi de l'alcool isopropylique devraient s'accompagner du strict respect des règles de sécurité. Il serait utile de le transvaser dans un récipient plus petit pour l'usage immédiat; les récipients de grande taille, destinés au stockage devraient, quant à eux, être tenus à distance du procédé de combustion.

La confection manuelle des moules peut exiger la manipulation d'objets lourds et encombrants. Les moules sont eux-mêmes très lourds, de même que les châssis de moulage. Ils doivent souvent être soulevés, déplacés et empilés à la main. Les accidents dorsalgiques ne sont pas rares et l'on doit mettre à la disposition des travailleurs des moyens mécaniques pour éviter qu'ils n'aient à soulever des objets trop pesants.

Il existe des versions standardisées pour les enceintes de confinement des mélangeurs à sable, des bandes transporteuses et des postes de coulée et de décochage, avec les volumes d'aspiration et les vitesses de captage et de transport correspondantes. La conformité à ces versions et un strict entretien préventif des systèmes de contrôle doivent permettre le respect des limites internationalement reconnues pour l'exposition aux poussières.

### **Le noyautage**

Ce sont les noyaux introduits dans le moule qui déterminent la configuration interne d'un objet moulé creux, tel que les passages d'eau d'un bloc moteur. Le noyau doit être suffisamment résistant

pour supporter les efforts de la coulée, tout en se laissant casser facilement pour que l'on puisse le retirer de la pièce lors du décochage.

Avant les années soixante, les mélanges pour noyaux se composaient de sable et de liants, tels que l'huile de lin, la mélasse ou la dextrine (sable pétrolifère). Le sable était serré dans une boîte à noyaux comportant une cavité de la forme du noyau, puis séché en étuve. Les étuves à noyaux dégagent des produits de pyrolyse nocifs et doivent être dotées de cheminées bien entretenues. Dans les conditions normales, les courants de convection qui se forment à l'intérieur de l'étuve devraient suffire à évacuer de l'atelier les vapeurs dégagées, même si cette pratique est une cause importante de pollution de l'air. Au sortir de l'étuve, les noyaux en sable pétrolifère peuvent dégager encore une certaine quantité de fumées, mais le risque reste mineur; toutefois, dans certains cas, de petites quantités d'acroléine peuvent représenter une nuisance considérable. Les noyaux peuvent faire l'objet d'un traitement par flambage pour améliorer le fini de la surface de la pièce coulée; dans ce cas, il y aura lieu de prendre les mêmes précautions qu'avec les moules.

Le moulage et le noyautage en coquille sont des procédés de thermdurcissage employés en fonderie de fer. Le sable neuf peut être mélangé à la résine à la fonderie même, ou arriver en sacs déjà enrobé de résine. Le sable enrobé de résine est injecté dans un modèle métallique (la boîte à noyaux). Le modèle est alors chauffé — au moyen de feux directs au gaz naturel dans le procédé de la boîte à noyaux chauffée ou par d'autres moyens dans le cas des noyaux et du moulage en coquille. Pour les boîtes à noyaux chauffées, on fait usage le plus souvent d'une résine thermdurcissable à base d'alcool furfurylique (furanne) et d'urée-formaldéhyde ou de phénol-formaldéhyde. Le moulage en coquille utilise une résine urée-formaldéhyde ou phénol-formaldéhyde. Après un bref temps de prise, le noyau durcit considérablement et peut être dégagé de la plaque-modèle par des tiges d'éjection. Le noyautage en boîte à noyaux chauffée et en coquille est une cause d'exposition considérable au formaldéhyde, cancérigène probable, et à d'autres contaminants, selon la nature du procédé. Parmi les mesures à prendre pour se protéger du formaldéhyde figurent une alimentation directe en air au poste de travail, un système de ventilation avec aspiration localisée au niveau de la boîte à noyaux, une enceinte fermée, un système de ventilation avec aspiration localisée au poste de stockage des noyaux et l'emploi de résines à faible émission de formaldéhyde. Il reste que le problème est difficile à maîtriser de façon satisfaisante. Les noyauteurs devraient bénéficier d'une surveillance médicale en vue de déceler d'éventuels problèmes respiratoires. Le contact de la résine phénol- ou urée-formaldéhyde avec la peau ou les yeux doit être évité, car ces résines sont des irritants ou des sensibilisateurs et peuvent être causes de dermatites. Un lavage à grande eau permettra d'éviter tout ennui.

Les systèmes de résines autodurcissables actuellement en usage comprennent les résines urée- et phénol-formaldéhyde catalysées à l'acide avec et sans alcool furfurylique; les isocyanates alkydes et phénoliques; le Fascold; les silicates autodurcissables; l'Inoset; le sable à ciment; et le sable fluidifié ou sable de fonderie. Les agglomérats durcissables à froid n'ont pas besoin de source de chaleur extérieure pour prendre. Les isocyanates employés dans les liants font normalement appel au méthylènediphénylisocyanate (MDI), lequel, s'il est inhalé, peut agir comme irritant ou sensibilisant respiratoire et être cause d'asthme. Le port de gants et de lunettes protectrices est à conseiller lorsqu'on manipule ou qu'on utilise ces composés. Quant aux isocyanates, ils devraient être très soigneusement entreposés dans des récipients hermétiquement clos, à l'abri de l'humidité et à une température comprise entre 10 et 30 °C. Les récipients vides devraient être remplis et immergés pendant vingt-quatre heures au moyen d'une solution de carbonate de sodium à 5% pour neutraliser les substances chimiques

résiduelles qui pourraient subsister dans et sur le fût. La mise en œuvre des procédés de moulage en résine devrait impérativement s'accompagner de toutes les précautions d'usage, mais c'est surtout lors de la manipulation des catalyseurs employés comme agents de prise qu'il faut procéder avec la plus grande prudence. Les catalyseurs destinés aux résines phénol-isocyanate huile-isocyanate sont généralement des amines aromatiques à base de composés pyridiques, se présentant sous la forme d'un liquide à l'odeur âcre. Ces composés peuvent être responsables de graves irritations de la peau, d'atteintes rénales et hépatiques et également affecter le système nerveux central. Ces composés sont soit fournis sous forme d'additifs séparés (liants trois parties), soit prémélangés avec les substances huileuses. Une ventilation avec aspiration localisée devrait être mise en place aux stades du mélange, du moulage, de la coulée et du décochage. Dans le cas de certains autres procédés ne comportant pas de cuisson, les catalyseurs utilisés sont l'acide phosphorique ou divers acides sulfoniques, lesquels sont également toxiques; toutes les précautions devraient être prises pour se prémunir contre les accidents en cours de transport ou d'emploi.

Le noyautage avec durcissement au gaz fait appel au procédé dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>-silicate et au procédé Isocure (ou «Ashland»). De nombreuses variantes du procédé CO<sub>2</sub>-silicate ont été mises au point depuis les années cinquante. Ce procédé a généralement servi à la production de moules et de noyaux de moyennes et grandes dimensions. Le sable du noyau est un mélange de silicate de sodium et de sable siliceux, généralement modifié par adjonction de substances telles que les mélasses, employées comme agents de désagrégation. Lorsque la boîte à noyaux est remplie, le noyau est séché par le passage du dioxyde de carbone à travers le mélange. Cette opération entraîne la formation de carbonate de sodium et de gel de silice, lequel sert de liant.

Le silicate de sodium est une substance alcaline qui peut être nocive si elle entre en contact avec la peau ou les yeux, ou si elle est ingérée. Il est conseillé de prévoir une douche d'urgence à proximité des ateliers où sont manipulées de grandes quantités de ce produit, et des gants devraient toujours être portés. Une fontaine pour des bains oculaires devrait être installée dans tout secteur de la fonderie où l'on met en œuvre du silicate de sodium. Le CO<sub>2</sub> peut être fourni à l'état solide, liquide ou gazeux. Lorsqu'il est livré en fûts ou en réservoirs sous pression, de nombreuses précautions devraient être prises, qu'il s'agisse de l'entreposage des fûts, de l'entretien des vannes, de la manutention, etc. Il faut également compter avec les propriétés du gaz lui-même, dont la présence peut faire tomber la teneur en oxygène de l'air dans les espaces clos à un niveau dangereux.

Le procédé Isocure sert à la confection des noyaux et des moules. Il s'agit d'un système de durcissement au gaz dans lequel une résine, le plus souvent du phénol-formaldéhyde, est mélangée à un diisocyanate (par exemple, le MDI) et à du sable. Le produit est injecté dans la boîte à noyaux, puis imprégné par voie gazeuse d'une amine, généralement la triéthylamine ou la diméthyléthylamine, de manière à provoquer la réaction de réticulation et donc le durcissement. Les amines, souvent vendues en fûts, sont des liquides extrêmement volatils à forte odeur d'ammoniac. Le risque d'incendie ou d'explosion est très réel et toutes les précautions voulues devraient être prises, surtout en cas de stockage en vrac. Ces amines ont pour caractéristique de provoquer une vision en halo et un gonflement de la cornée; elles peuvent également affecter le système nerveux central et provoquer des convulsions, la paralysie et, plus rarement, la mort. En cas de contact des amines avec les yeux ou la peau, les premiers soins comporteront avant tout d'abondantes applications d'eau pendant au moins quinze minutes et la consultation immédiate d'un praticien. Avec le procédé Isocure, l'amine est appliquée sous forme de vapeur dans un gaz vecteur (l'azote), l'excès

d'amine étant absorbé dans une tour de lavage pour acides. Même si les émanations gazeuses résiduelles d'amine des noyaux manufacturés jouent un certain rôle, la principale cause d'exposition importante reste les fuites des boîtes à noyaux. On s'entourera de toutes les précautions voulues lors de la manipulation de ces dernières, et un système de ventilation avec aspiration localisée devrait être installé pour évacuer les vapeurs accumulées dans les ateliers.

#### *Le dessablage, le décochage et le dénoyautage*

Une fois le métal en fusion refroidi, la pièce brute de fonderie doit être retirée du moule. Il s'agit d'une opération bruyante qui, dans bien des cas, expose les travailleurs à des niveaux sonores largement supérieurs à 90 dBA pendant une journée de huit heures. S'il n'est pas possible d'abaisser le niveau sonore, des protecteurs de l'ouïe devraient être remis aux intéressés. Le moule est séparé de la pièce coulée par ébranlage. Il arrive fréquemment que l'on fasse tomber le châssis de moule, le moule et la pièce coulée sur une grille vibrante pour détacher le sable (dessablage). Celui-ci tombe à travers la grille dans une trémie ou sur un transporteur à bande où il peut être soumis à des trieurs magnétiques et recyclé pour broyage, traitement et réutilisation, ou tout simplement mis au rebut. Au lieu du dessablage sur grille, on a parfois recours au dessablage par voie humide, ce qui dégage moins de poussières. C'est également à ce stade que l'on retire le noyau, là encore en faisant parfois appel à des jets d'eau à haute pression.

La pièce coulée est alors reprise et envoyée à l'étape suivante, le décochage. Bien souvent, les petites pièces peuvent être simplement expulsées du châssis avant le dessablage, ce qui diminue le dégagement de poussières. Ces opérations produisent des niveaux de poussières siliceuses dangereux parce que le sable s'est trouvé en contact avec le métal en fusion et est par conséquent extrêmement sec. Le métal et le sable sont encore très chauds. Il est donc indispensable de prévoir une protection des yeux. Les passages et les aires de travail doivent être libres de toutes ferrailles sur lesquelles on pourrait trébucher et de poussières susceptibles d'être remises en suspension et d'être inhalées.

La question de savoir si les nouveaux liants mis en œuvre dans les noyaux ont un effet quelconque sur la santé des travailleurs et, notamment, des dénoyauteurs, n'a fait l'objet que de rares études. Les furannes, l'alcool furfurylique et l'acide phosphorique, les résines urée-formaldéhyde et phénol-formaldéhyde, le silicate de sodium et le dioxyde de carbone, les systèmes autodurcissables, l'huile de lin modifiée et le MDI subissent tous une certaine décomposition thermique lorsqu'ils sont exposés aux températures des métaux en fusion.

Les effets des particules de silice enrobées de résine sur l'apparition de la pneumoconiose n'ont fait l'objet d'aucune étude. On ignore si ces revêtements freineront ou accéléreront la formation des lésions des tissus pulmonaires. On craint que les produits de réaction de l'acide phosphorique ne libèrent de la phosphine. L'expérimentation sur l'animal et certaines études ont montré que lorsque la silice a été traitée par un acide minéral, ses poussières agissent beaucoup plus rapidement sur les tissus pulmonaires. L'urée-formaldéhyde et le phénol-formaldéhyde peuvent dégager des phénols libres, des aldéhydes et du monoxyde de carbone. Les sucres destinés à faciliter le démoulage des noyaux dégagent des quantités importantes de monoxyde de carbone. Les agglomérants autodurcissables libèrent des isocyanates (par exemple, le MDI) et du monoxyde de carbone.

#### *L'ébarbage (nettoyage)*

Le nettoyage des pièces, y compris l'ébarbage, est exécuté après le démoulage et le dénoyautage. Les différents procédés, qui reçoivent des noms différents d'un endroit à l'autre, peuvent être classés globalement comme ci-après:

- le *nettoyage*, qui comprend le décochage, le dégrossissage, l'élimination du sable de moulage adhérent, du sable à noyaux, des jets, des masselottes, des bavures et autres matériaux facilement détachables, à l'aide d'outils à main ou d'outils pneumatiques portatifs;
- l'*ébarbage* proprement dit, qui englobe l'enlèvement des adhérences de sable vitrifié, des coutures, du métal excédentaire tel que soufflures, bosses, dartres ou autres défauts, et le finissage des pièces au moyen de burins, d'outils pneumatiques et de brosses métalliques. Les techniques apparentées au soudage, telles que l'oxycoupage, l'arc électrique, le chalumeau arc-air, le nettoyage sous pression et la torche à plasma, sont appliquées surtout pour brûler les jets de coulée, réparer les pièces de fonderie ainsi que pour les opérations de découpage et de nettoyage.

L'ébarbage commence par l'enlèvement des jets de coulée. Une fraction importante, parfois la moitié, du métal coulé dans le moule ne fait pas partie de la pièce définitive. En effet, le moule doit nécessairement comporter des évidements, des jets et des événements qui permettent de le remplir du métal dont sera constitué l'objet de fonderie. On peut généralement détacher les jets de coulée au stade du décochage, mais il arrive parfois que cette opération constitue un stade distinct des opérations de nettoyage des pièces. On enlève les jets à la main, habituellement au moyen d'un marteau. Pour limiter le bruit, les marteaux métalliques peuvent être remplacés par des marteaux recouverts de caoutchouc, les bandes transporteuses étant doublées également de caoutchouc qui les rendront moins bruyantes. Il est impératif que le personnel porte une protection des yeux contre les fragments de métal brûlant projetés au cours de cette opération. Les déchets d'ébarbage ne doivent pas s'accumuler dans l'atelier, mais être retournés à la zone de chargement de la fonderie. Après détachage des jets de coulée (mais parfois avant), la plupart des pièces de fonderie subissent un grenailage ou un passage au tonneau dessableur rotatif pour enlever les déchets de moulage et, éventuellement, améliorer le fini des pièces. Les tonneaux dessableurs rotatifs sont extrêmement bruyants. Il pourrait être nécessaire de les placer dans des enceintes insonorisées, éventuellement avec une ventilation avec aspiration localisée.

Qu'il s'agisse de fonderies de fonte, d'acier ou de métaux non ferreux, les méthodes de nettoyage sont très similaires; pourtant, le nettoyage et l'ébarbage des fontes d'acier présentent des difficultés particulières en raison d'une fréquence plus grande des adhérences de sable vitrifié que dans le cas des fontes de fer ou de métaux non ferreux. Le sable vitrifié présent à la surface des grosses pièces d'acier peut renfermer de la cristobalite, plus toxique que le quartz contenu dans le sable vierge.

Les procédés de dessablage non pneumatique à la grenaille ou de dessablage au tonneau des pièces coulées avant burinage et meulage devraient être appliqués pour éviter toute surexposition à la poussière de silice. La pièce ne doit pas être recouverte de poussière visible, encore que le risque lié à la silice puisse tout de même exister au meulage si la silice est incluse sous forme vitrifiée dans la surface métallique apparemment nette de la pièce. Dans le grenailage, la grenaille est projetée contre la pièce par la force centrifuge, sans présence d'aucun travailleur dans la chambre de dessablage. Celle-ci doit être cependant ventilée de manière qu'il n'y ait aucune émission visible de poussières. Il n'existe de problème de poussière de ce genre qu'en cas de panne ou de détérioration de la chambre de dessablage ou du ventilateur et du collecteur.

Pour éliminer le sable adhérent, la pièce peut être soumise à un jet d'eau à haute pression, à un jet d'eau et de sable, ou à une projection de grenaille de fonte ou d'acier. Pour ce qui concerne le décapage au sable, il a été interdit dans plusieurs pays (au Royaume-Uni, par exemple) en raison du risque de silicose; en

effet, les particules de sable deviennent de plus en plus fines et la fraction respirable ne fait que s'accroître. Il va de soi qu'en cas de fausse manœuvre les jets d'eau à haute pression et le grenailage peuvent aussi présenter des risques pour le personnel. Ces opérations devraient donc toujours être pratiquées dans une enceinte fermée et isolée. Les cabines de dessablage devraient être inspectées à intervalles réguliers pour s'assurer que le système d'extraction des poussières fonctionne bien et qu'il n'y ait pas de fuite permettant des projections d'eau ou de grenaille dans la fonderie. Les casques destinés aux grenailleurs devraient être d'un modèle agréé et soigneusement entretenus. Il est conseillé d'apposer à la porte de la cabine de grenailage un écriteau informant le personnel qu'une opération de décapage est en cours et que l'entrée est interdite à toute personne étrangère au service. Des systèmes de verrouillage, couplés au circuit des moteurs de l'appareil de grenailage, pourront interdire l'ouverture des portes tant que l'opération de grenailage ne sera pas terminée.

Des meules de différents types sont employées pour lisser les pièces brutes de fonderie. Les meules sont montées soit sur des machines à bâti ou à socle, soit sur des machines portatives ou à montage pendulaire. Les tourets sur socle sont utilisés pour les petites pièces; les meules portatives, les meules assiettes, les meules boisseaux et les meules coniques servent à diverses opérations, notamment au lissage intérieur des pièces de fonderie évidées; quant aux meuleuses pendulaires, elles servent surtout pour les grandes pièces, sur lesquelles il est nécessaire d'enlever d'importantes quantités de métal.

## Autres fonderies

### Les fonderies d'acier

Les opérations exécutées dans une fonderie d'acier (par opposition à une aciérie proprement dite) sont dans l'ensemble les mêmes que dans une fonderie de fonte; toutefois, les températures du métal y sont beaucoup plus élevées. Il en résulte que la protection des yeux au moyen de lunettes teintées est indispensable et que la silice du moule est transformée par la chaleur en tridymite ou en cristobalite, deux variétés cristallines de silice particulièrement dangereuses pour les poumons. Il arrive souvent que le sable se vitrifie sur les pièces et qu'il faille l'enlever par des moyens mécaniques, ce qui donne lieu à des poussières dangereuses; aussi faut-il impérativement prévoir un système d'aspiration efficace et le port d'un appareil de protection respiratoire.

### Les fonderies d'alliages légers

Ces alliages sont essentiellement à base d'aluminium ou de magnésium. Ils contiennent souvent de faibles quantités de métaux qui, lorsque certaines conditions sont réunies, dégagent des fumées toxiques. Ces fumées doivent être analysées pour la détermination de leurs éléments constitutifs.

Dans les fonderies d'aluminium et de magnésium, la fusion s'opère généralement dans des fours à creuset. La présence d'ouvertures d'aspiration autour de la partie supérieure du creuset pour éliminer les vapeurs est recommandée. Dans les fours chauffés au mazout, une combustion incomplète due à des brûleurs défectueux peut être la cause d'émissions de produits tels que le monoxyde de carbone. Les fumées de fours à creuset peuvent renfermer des hydrocarbures complexes dont certains peuvent être cancérigènes. Durant le nettoyage du four et du carneau, il existe un danger d'exposition au pentoxyde de vanadium, contenu dans les suies formées par les dépôts de mazout.

Le fluorspar utilisé comme fondant en fonderie d'aluminium peut dégager dans l'air ambiant des quantités importantes de poussières de fluorures. Dans certains cas, le chlorure de baryum a été utilisé comme fondant pour les alliages de magnésium; étant donné qu'il s'agit d'une substance notablement toxique, son em-

ploi doit s'accompagner de grandes précautions. Les alliages légers sont parfois dégazés par passage de dioxyde de soufre ou de chlore (ou de composés commerciaux qui produisent du chlore en se décomposant) à travers le métal en fusion; un système d'aspiration et le port d'appareils de protection respiratoire sont donc indispensables pour cette opération. Pour ralentir le refroidissement du métal dans le moule, un mélange de poudres d'aluminium et d'oxyde de fer le plus souvent à forte réaction exothermique est placé dans la masselote. Ce mélange connu sous le nom de thermitte dégage d'épaisses fumées dont on a pu vérifier l'innocuité; lorsqu'elles étaient de teinte brunâtre, on a soupçonné la présence d'oxydes azotés, ce qui s'est révélé faux. Les fines particules d'aluminium produites par l'ébavurage des pièces coulées en aluminium et en magnésium, par contre, présentent un risque aigu d'incendie; aussi le dépoussiérage doit-il se faire par voie humide.

La réalisation de pièces coulées en magnésium s'accompagne de risques considérables d'incendie et d'explosion. Comme le magnésium en fusion s'enflamme au contact de l'air, il faut intercaler entre ces deux corps une couche protectrice, qui est généralement constituée par du soufre fondu. Les fondeurs qui appliquent à la main la poudre de soufre sur le creuset peuvent être atteints de dermatites; ils devraient donc porter des gants faits d'une matière ignifugée. Au contact du métal, le soufre brûle constamment en dégageant des quantités importantes de dioxyde de soufre. Un système d'aspiration devrait donc être installé. Les travailleurs devraient être informés du danger d'inflammation d'un creuset ou d'une poche de magnésium en fusion, avec dégagement possible d'un brouillard intense constitué de fines particules d'oxyde de magnésium. Tous les fondeurs de magnésium devraient porter des vêtements de protection ignifugés. Si ces vêtements sont recouverts de poussières de magnésium, ils ne devraient pas être rangés sans que l'on s'assure qu'il n'y a pas d'humidité dans les armoires des vestiaires, humidité qui pourrait provoquer l'inflammation spontanée de ces poussières. Les poussières de magnésium devraient être enlevées des vêtements. La craie de tailleur est un produit très utilisé dans les fonderies pour le poteyage; pour prévenir le risque de talcose, il doit exister un système de réduction des poussières. On emploie aussi, pour déceler les fissures dans les pièces coulées en alliages légers, des huiles et des poudres auxquelles sont venus s'ajouter des colorants qui améliorent l'efficacité du contrôle. Il a été observé que certains colorants rouges étaient absorbés, puis excrétés dans la sueur, salissant ainsi les effets personnels; malgré l'inconvénient que cela représente, aucune répercussion sur la santé n'a été constatée.

#### **Les fonderies d'alliages à base de cuivre**

Des fumées métalliques toxiques et des poussières provenant de certains alliages sont un risque spécifique des fonderies de laiton et de bronze. Des expositions au plomb supérieures aux limites de sécurité lors de la fusion, de la coulée ou des opérations de finition ne sont pas rares, surtout lorsque les alliages ont une forte teneur en plomb. Le risque présenté par le plomb lors du nettoyage des fours et de l'évacuation des crasses est particulièrement grave. La surexposition au plomb est aussi fréquente lors de la fusion et de la coulée et peut se produire également lors des travaux de meulage. Les vapeurs de zinc et de cuivre (les éléments constitutifs du bronze) sont la principale cause de la fièvre des fondeurs, même si cette affection a été observée aussi chez des fondeurs travaillant le magnésium, l'aluminium, l'antimoine, etc. Certains alliages à haute résistance contiennent du cadmium, lequel peut provoquer la pneumonie chimique par exposition aiguë ainsi que des atteintes rénales et le cancer du poumon par exposition chronique.

#### **Les procédés faisant appel à des moules permanents**

Le moulage en moules métalliques permanents (coquilles), comme dans la coulée sous pression, a représenté un grand progrès en

fonderie. Dans ce cas, le modelage est largement remplacé par des procédés mécaniques et se résume en fait à une opération de matriçage. La plupart des risques inhérents au modelage se trouvent éliminés, de même que ceux liés à l'emploi du sable, mais ils sont remplacés par un certain risque inhérent à l'emploi de matériaux réfractaires devant servir de revêtement à la matrice ou au moule. En fonderie moderne, on fait de plus couramment usage de noyaux en sable, auquel cas les risques liés aux poussières dégagées par la fonderie en sable demeurent.

#### **La coulée sous pression**

L'aluminium est très fréquemment coulé sous pression. Les pièces automobiles telles que les enjoliveurs chromés sont le plus souvent en zinc coulé sous pression, recevant ensuite un placage de cuivre, de nickel et de chrome. Le risque de fièvre des fondeurs due aux fumées de zinc devrait être constamment contrôlé, de même que celui que font courir les brouillards d'acide chromique.

Les machines à injection présentent tous les risques propres aux presses hydrauliques. A cela s'ajoutent les brouillards que peuvent produire les huiles servant à lubrifier les coquilles, contre l'inhalation desquels il faut protéger les travailleurs, tout en empêchant leurs vêtements de s'imprégner d'huile. Les liquides hydrauliques résistant au feu utilisés dans les presses pouvant contenir des composés organophosphorés toxiques, des précautions particulières devraient être prises pendant les travaux d'entretien des circuits hydrauliques.

#### **Le moulage de précision**

L'un des principaux procédés de moulage de précision est le moulage à cire perdue, dans lequel les modèles sont produits par injection de cire dans un moule; ces modèles sont enduits d'une mince couche de poudre réfractaire qui sert de matériau de garniture du moule, après quoi on fait fondre la cire avant la coulée, à moins que sa fusion ne soit provoquée par l'injection du métal fondu.

L'opération de vidange de la cire comporte un risque certain d'incendie; par ailleurs, la décomposition de la cire génère de l'acroléine et d'autres produits de décomposition dangereux. Quant aux étuves, elles doivent être convenablement ventilées. On a utilisé le trichloroéthylène pour éliminer les dernières traces de cire; ce solvant peut s'accumuler dans les évidements du moule ou être absorbé par le matériau réfractaire pour ensuite s'évaporer ou se décomposer pendant la coulée. En raison des risques propres à l'amiante, il conviendrait de renoncer à l'emploi de matériaux réfractaires contenant de l'amiante pour le procédé à cire perdue.

#### **Les problèmes de santé et les pathologies**

On doit déplorer en fonderie des taux de mortalité plus élevés que dans d'autres secteurs industriels; cette surmortalité est liée aux projections de métal en fusion et aux explosions, aux accidents lors de l'entretien des cubilots et, notamment, à l'ouverture du fond mobile, sans compter les risques d'exposition au monoxyde de carbone lors du regarnissage. Par rapport à d'autres établissements industriels, les fonderies font état d'une plus forte incidence de blessures par corps étrangers, contusions et brûlures et, par contre, d'une plus faible proportion d'accidents musculo-squelettiques. Les niveaux sonores y comptent également parmi les plus élevés.

Une étude portant sur plusieurs dizaines d'accidents mortels survenus dans des fonderies a mis en évidence les causes suivantes: écrasement entre des parties du bâtiment et des wagonnets destinés au transport des moules pendant l'entretien et le dépannage; écrasement pendant le nettoyage de malaxeurs à meule commandés à distance; brûlures par projections de métal en fusion dues à la défaillance d'une grue ou d'un pont roulant, au fissurage des moules, au débordement d'une poche de coulée, à

une explosion de vapeur dans une poche mal séchée; chutes depuis une grue, une passerelle ou un pont roulant; électrocution par des appareils de soudage; écrasement par des véhicules de manutention; brûlures occasionnées par l'ouverture du fond mobile du cubilot; exposition à une atmosphère excessivement chargée en oxygène ou, au contraire, au monoxyde de carbone lors de la réparation des cubilots.

### Les meules

L'éclatement ou la rupture des meules peuvent blesser gravement ou même mortellement: dans les tourets à socle, l'espace séparant la meule de son support ne doit pas être trop important, sinon la main ou l'avant-bras risquent d'être happés et écrasés. S'ils ne sont pas protégés, les yeux sont continuellement exposés. Glissades et chutes, surtout lors du port de lourdes charges, peuvent être occasionnées par des sols mal entretenus ou encombrés. Des chutes d'objets, ou des charges qu'on laisse tomber peuvent causer des blessures aux pieds. Les efforts excessifs liés au soulèvement et au transport d'objets lourds peuvent être à l'origine d'entorses ou de claquages. Le mauvais entretien des appareils de levage peut entraîner leur défaillance et la chute d'objets sur les travailleurs. Le matériel électrique, notamment l'outillage à main, mal entretenu ou non relié à la terre peut être cause d'électrocutions.

Tous les éléments dangereux des machines, particulièrement des meules, devraient être munis de protecteurs adéquats, avec arrêt automatique si l'on retire le protecteur pendant la marche. D'une manière générale, les meules devraient être soigneusement entretenues et vérifiées, et leur vitesse réglée avec précision (les meules portatives exigeant des soins particulièrement rigoureux). Le matériel électrique devrait être maintenu en parfait état de marche et les règles de mise à la terre strictement suivies. Les travailleurs devraient être formés aux méthodes rationnelles de levage et de transport des charges et savoir comment fixer correctement celles-ci aux crochets des grues et autres appareils de levage. Ils devraient disposer d'équipements de protection individuelle, notamment pour les yeux, le visage, les pieds et les jambes. On devrait veiller à ce que les premiers soins soient rapidement donnés, même si la lésion n'est pas grave, et à ce que, en cas de blessure plus grave, il soit fait appel à un médecin.

### Les poussières

Les affections liées aux poussières sont très répandues parmi les travailleurs des fonderies. Même dans les plus modernes d'entre elles, où les opérations de nettoyage des pièces sont bien contrôlées et où les objets de fonderie ne portent pas de poussières visibles, les expositions à la silice sont fréquemment proches des limites d'exposition prescrites, quand elles ne les dépassent pas. Des expositions plusieurs fois supérieures aux limites se produisent lorsque les pièces sont poussiéreuses ou que les cabines d'ébarbage ne sont pas étanches. Il y a risque probable de surexposition lorsque des poussières visibles échappent à l'aspiration lors des opérations de dessablage, de préparation des sables ou de réparation des réfractaires.

La silicose est la maladie professionnelle la plus répandue dans les ateliers d'ébarbage de l'acier; dans l'ébarbage du fer, ce sont les pneumoconioses mixtes qui prédominent (Landrigan et coll., 1986). A la fonderie, la prévalence s'accroît avec la durée de l'exposition et l'importance de la concentration de poussières. Il semble que le risque de silicose soit plus grand dans les fonderies d'acier que dans les fonderies de fer en raison des teneurs plus élevées en silice libre. On n'est pas encore parvenu à fixer de manière concluante un niveau d'exposition pour lequel il n'y ait plus de risque de silicose; le seuil est probablement inférieur à 100 mg/m<sup>3</sup>, voire à la moitié de cette valeur.

Dans la plupart des pays, le nombre de cas nouveaux de silicose est en régression, ce qui est dû en partie à l'évolution des technolo-

gies, les industriels ayant renoncé au sable siliceux dans les fonderies et ayant remplacé, pour la fusion de l'acier, les briques de silice par des garnitures de creuset basiques. La raison principale est en fait la réduction des effectifs des aciéries et des fonderies par suite de l'automatisation. Cependant, dans de nombreuses fonderies, l'exposition aux poussières de silice respirables demeure élevée malgré tous les efforts, tandis que dans les pays où l'on continue à employer une main-d'œuvre nombreuse, la silicose reste un problème majeur.

La silico-tuberculose est une maladie connue depuis longtemps chez les fondeurs. Là où la prévalence de la silicose a décliné, on a constaté une diminution parallèle des cas déclarés de tuberculose, même si cette maladie n'a pas été complètement éradiquée. Dans les pays où les concentrations de poussières demeurent élevées, où les procédés industriels qui dégagent beaucoup de poussières font appel à une main-d'œuvre nombreuse et où il y a une forte prévalence de la tuberculose dans la population générale, cette dernière maladie reste une importante cause de décès chez les fondeurs.

De nombreux travailleurs atteints de pneumoconiose souffrent aussi de bronchite chronique, souvent associée à l'emphysème; l'influence des conditions de travail sur ces complications, dans certaines occasions du moins, est soupçonnée depuis longtemps par de nombreux chercheurs. Des cas de cancer du poulmon, de pneumonie lobaire, de broncho-pneumonie et de thrombose coronarienne associés à une pneumoconiose ont été signalés chez des fondeurs.

Une analyse des études de mortalité chez des fondeurs et, notamment, chez ceux de l'industrie automobile aux Etats-Unis a montré dans 14 sur 15 de ces études un accroissement du nombre des décès par cancer du poulmon. Etant donné que l'on observe des taux élevés de cancer du poulmon parmi les travailleurs des chambres d'ébarbage, où le principal risque est la silice, il est vraisemblable que l'on a également affaire à des expositions mixtes.

Les études sur les substances cancérigènes présentes en fonderie ont été axées sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques qui se forment lors de la décomposition thermique des additifs au sable et des liants. Certaines suggèrent que des métaux tels que le chrome et le nickel, de même que des poussières de silice et d'amiante, pourraient être responsables d'une partie de la surmortalité. Les différences de composition chimique au niveau du moulage et du noyautage, de nature des sables et de composition des alliages à base de fer et d'acier pourraient expliquer les écarts du niveau de risque constatés d'une fonderie à l'autre (Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), 1984).

Sur 11 études, 8 ont fait apparaître un surcroît de mortalité par maladies respiratoires non malignes. Des décès par silicose ont également été enregistrés. Des études cliniques ont révélé dans des fonderies industrielles modernes «propres» des modifications radiologiques caractéristiques de la pneumoconiose, des déficits de la fonction pulmonaire révélateurs d'une obstruction, ainsi que des symptômes respiratoires aggravés. Comme ces symptômes résultaient d'expositions survenues après les années soixante, il y a tout lieu de croire que les risques sanitaires présents dans les fonderies les plus anciennes n'ont pas encore été éliminés.

La prévention des affections pulmonaires est essentiellement un problème de réduction des émissions de poussières et de fumées; l'installation de systèmes de ventilation générale et de ventilation avec aspiration localisée est une mesure applicable à toutes les opérations; dans certains cas, s'agissant notamment des meules portatives et des outils pneumatiques, on aura avantage à employer des systèmes d'aspiration à faible volume, mais à vitesses élevées.

Les burins pneumatiques ou à main qui servent à détacher les incrustations de sable calciné produisent de grandes quantités de poussières microscopiques. L'enlèvement des dépôts à l'aide de

brosses métalliques rotatives ou de brosses ordinaires libère également beaucoup de poussières et exige donc un système de ventilation localisée.

L'installation de systèmes d'aspiration sur les meules à socle et à montage pendulaire ne pose aucune difficulté. Les meules portatives servant aux petites pièces seront installées sur des établis ventilés, ou équipées elles-mêmes d'un système d'aspiration. Le décapage à la brosse peut également s'effectuer sur des établis ventilés. La réduction des émissions de poussières dégagées lors du nettoyage des grosses pièces de fonderie pose certains problèmes, mais les systèmes d'aspiration à faible volume et à vitesse élevée ont apporté des améliorations considérables. Les travailleurs n'aimant pas ces appareils, auxquels ils reprochent parfois d'être encombrants et de gêner la visibilité, il convient donc de les persuader de leur utilité grâce à une formation théorique et pratique adéquate.

Le nettoyage et l'ébarbage des très grosses pièces, pour lesquelles une ventilation localisée n'est pas envisageable, devraient se faire dans un emplacement distinct totalement isolé, à des heures où le personnel est peu nombreux. Tous les travailleurs devraient être dotés d'équipements de protection individuelle et savoir les utiliser correctement; ces équipements doivent être régulièrement nettoyés et réparés.

Depuis les années cinquante, diverses résines synthétiques ont été introduites en fonderie pour servir de liants au sable dans les noyaux et les moules. Ces systèmes comportent généralement un matériau de base et un catalyseur ou un durcisseur qui déclenchent la polymérisation. Bon nombre de ces substances chimiques sont des sensibilisateurs (par exemple, les isocyanates, l'alcool furfurylique, les amines et le formaldéhyde) et leur implication dans des cas d'asthme professionnel chez les fondeurs est désormais établie. Au cours d'une étude, sur 78 fondeurs exposés aux résines Pepset (boîte de moulage froide), 12 présentaient des symptômes asthmatiques et, sur le nombre, 6 manifestaient une nette diminution des débits volumétriques d'air lors d'un test de provocation faisant appel au diisocyanate de méthyle (Johnson et coll., 1985).

### **Le soudage**

Dans les ateliers d'ébarbage, les opérations de soudage sont une source d'exposition aux fumées métalliques et présentent un risque d'intoxication et de fièvre des fondeurs, selon la composition des métaux en cause. Les opérations de soudage sur la fonte s'effectuent avec des baguettes à base de nickel et il y a donc exposition aux fumées de ce métal. La torche à plasma produit des quantités considérables de fumées métalliques, d'ozone, d'oxyde d'azote et de rayonnement ultraviolet. De plus, elle est très bruyante.

Les petites pièces peuvent être soudées sur des établis comportant un système de ventilation avec aspiration localisée. En revanche, le soudage et le brûlage, dans le cas des grosses pièces, peuvent s'avérer délicats. On a obtenu de bons résultats en centralisant ces opérations dans un emplacement unique. La ventilation avec aspiration localisée peut se faire au moyen d'un conduit souple placé au-dessus du point de soudage. On doit donc enseigner aux soudeurs à déplacer ce conduit au fur et à mesure des opérations. Les poussières et les fumées qui subsistent seront éliminées à l'aide d'un système de ventilation générale adéquat et leurs effets seront réduits au moyen d'un équipement de protection individuelle.

### **Le bruit et les vibrations**

Dans les fonderies, les opérations les plus bruyantes sont généralement le décochage et le dessablage; le niveau sonore est en outre plus fort dans les fonderies mécanisées que dans les installations non mécanisées. Quant au système de ventilation, il peut être la cause de niveaux d'exposition proches de 90 dBA.

Le niveau sonore des opérations d'ébarbage est de 115 à 120 dBA pour les fontes d'acier et de 105 à 115 dBA pour les fontes de fer. L'Association britannique de recherche en matière de moulage d'acier (The British Steel Casting Research Association) a étudié les sources sonores dans l'ébarbage, qui comprennent:

- les conduits d'évacuation des ébarbeuses;
- le choc des marteaux ou le bruit des meules sur les pièces de fonderie;
- la résonance des pièces de fonderie et les vibrations de leurs supports;
- la transmission des vibrations des supports aux éléments qui les entourent;
- la réflexion des ondes sonores par les hottes des systèmes d'aspiration.

Les stratégies de lutte contre le bruit varient en fonction de la dimension des pièces, de la nature du métal, de l'espace disponible, de l'emploi d'outils portatifs, etc. Il existe un certain nombre de mesures générales qui permettent de réduire le niveau d'exposition sonore des intéressés et des autres travailleurs: aménagement des programmes de travail et séparation des locaux; confinement total ou cloisons isolantes; et emploi de plans de travail absorbant le son, d'écrans, de panneaux et d'auvents en matériaux isolants divers et autres matériaux acoustiques. Les directives relatives aux limites d'exposition quotidienne devraient être strictement observées et, en cas de besoin, on aura recours aux dispositifs de protection individuelle.

La British Steel Casting Research Association a mis au point un banc d'ébarbage qui réduit de 4 à 5 dBA environ le bruit du burinage. Cet établi présente en outre l'avantage d'être équipé d'un système d'aspiration des poussières. C'est là un résultat encourageant qui permet d'espérer que, grâce à de nouvelles améliorations, on parviendra à réduire encore davantage les niveaux sonores.

### **Le syndrome des vibrations transmises au système main-bras**

On observe parfois le syndrome de Raynaud chez les travailleurs qui emploient des outils vibrants portatifs. Il est plus répandu dans l'ébarbage de l'acier que dans celui du fer et plus fréquent chez les travailleurs qui se servent d'appareils rotatifs. Le seuil critique à partir duquel ce phénomène apparaît se situe entre 2 000 et 3 000 tours/min pour une fréquence de 40 à 125 Hz.

On estime aujourd'hui que le syndrome de Raynaud a des effets sur un certain nombre d'autres tissus de l'avant-bras, en plus des nerfs périphériques et des vaisseaux sanguins. Il est associé au syndrome du canal carpien et à des évolutions dégénératives des articulations. Une étude conduite parmi les burineurs et les meuleurs des aciéries a révélé qu'ils étaient deux fois plus exposés au risque de maladie de Dupuytren qu'un groupe témoin (Thomas et Clarke, 1992).

Il est possible de réduire considérablement les vibrations transmises aux mains grâce aux mesures suivantes: choisir des outils conçus pour limiter l'étendue des plages de vibrations de fréquence et d'amplitude dangereuses; maintenir les outils de telle sorte que leur orifice d'évacuation soit aussi éloigné que possible des mains; porter plusieurs paires de gants ou des gants isolants; et diminuer le temps d'exposition en faisant alterner les travaux bruyants et les travaux moins bruyants, en changeant d'outils et en ménageant des pauses.

### **Les problèmes oculaires**

Certaines des poussières et substances chimiques présentes dans les fonderies (isocyanates, formaldéhyde et amines tertiaires telles que la diméthyléthylamine, la triéthylamine, etc.) sont des irritants

dont on sait qu'ils causent des symptômes oculaires chez les travailleurs exposés. Il s'agit d'irritation des yeux, de larmoiement, de vision trouble ou de vision «bleu-gris». Compte tenu de la fréquence d'apparition de ces effets, on a recommandé un abaissement de la moyenne pondérée dans le temps des expositions à moins de 3 ppm.

#### Autres problèmes

On trouve dans des ateliers de noyautage faisant appel au procédé de moulage en boîte, même bien gérés, des expositions au formaldéhyde pouvant atteindre ou dépasser la limite d'exposition fixée aux Etats-Unis; bien entendu, là où les mesures de prévention et de réduction sont insuffisantes, les expositions peuvent être plusieurs fois supérieures à cette limite.

Les fonderies ont largement fait appel à l'amiante et, jusqu'à une époque récente, celle-ci était couramment utilisée dans les vêtements de protection des fondeurs soumis à une exposition à la chaleur. Ses effets ont pu être constatés lors d'enquêtes radiologiques conduites auprès des fondeurs qui, affectés à la production ou à l'entretien, avaient été exposés à l'amiante; lors d'une enquête transversale, sur 900 travailleurs des aciéries, 20 présentaient une affection pleurale caractéristique (Kronenberg et coll., 1991).

#### Les examens périodiques

Des examens médicaux préembauche et périodiques comprenant le relevé des symptômes, une radiographie thoracique, des examens de la fonction pulmonaire et des audiogrammes devraient être prévus pour tous les fondeurs, y compris l'indispensable suivi en cas de doute ou d'anomalies. Comme on sait que l'usage du tabac vient renforcer le risque de difficultés respiratoires chez les fondeurs, il est très important de conseiller aux intéressés de cesser de fumer et de leur proposer un programme d'éducation et de promotion en matière de santé.

#### Conclusion

Depuis des siècles, la fonderie est un secteur fondamental de l'industrie. Malgré de continuels progrès techniques, ces activités comportent de nombreux risques pour la sécurité et la santé des fondeurs. Dans la mesure où les risques subsistent même dans les usines modernes pouvant faire état de programmes exemplaires de prévention et de lutte, la protection de la santé et du bien-être des travailleurs demeurent pour la direction, les travailleurs et leurs représentants un défi de chaque instant. Défi au demeurant difficile à relever aussi bien en période de marasme (où les préoccupations de sécurité et de santé du travailleur tendent à passer au second plan) qu'en période de haute conjoncture (où, pour répondre à la demande, on peut être tenté de faire l'impasse sur les règles de sécurité et de prendre des risques). L'éducation et la formation en matière de sécurité et de santé restent par conséquent des éléments permanents.

## ● LE FORGEAGE ET L'EMBOUITISSAGE

Robert M. Park

#### Généralités

La mise en forme de pièces métalliques par application de puissants efforts de compression et de traction est pratique courante dans l'industrie. Lors des opérations d'emboutissage, le métal, le plus souvent sous forme de tôles, de feuillards en bobines ou coupés à longueur, reçoit des formes particulières à température ambiante par cisailage, pressage et étirage entre des matrices, en une ou plusieurs passes. C'est à partir d'acier laminé à froid que sont exécutées de nombreuses opérations d'emboutissage desti-

nées à fabriquer des pièces métalliques pour l'industrie automobile, l'électroménager, etc. Environ 15% des travailleurs de l'industrie automobile travaillent à des opérations ou dans des ateliers d'emboutissage.

En forgeage, l'effort de compression est appliqué à des blocs préformés (ébauches) de métal, généralement portés à haute température, là encore moyennant une ou plusieurs passes distinctes. La forme de la pièce finie est déterminée par celle des évidements de la ou des matrices métalliques utilisées. Avec les matrices à empreinte ouverte, comme dans le cas du forgeage au pilon, l'ébauche est comprimée entre la matrice et le piston. Avec les matrices à empreinte fermée, comme dans le matriçage, l'ébauche est comprimée entre la matrice inférieure et une matrice supérieure fixée sur le piston.

Les marteaux-pilons utilisent un cylindre à vapeur ou à air comprimé pour soulever le marteau, qui retombe ensuite par gravité, à moins qu'il soit également mû à la descente par la vapeur ou l'air comprimé. Le nombre et la force des coups de marteau sont réglés manuellement par l'opérateur de la machine qui maintient souvent l'extrémité froide de la pièce à forger tout en assurant le fonctionnement du marteau-pilon. Autrefois, le forgeage au marteau-pilon représentait les deux tiers environ des travaux de forge exécutés aux Etats-Unis, mais il est aujourd'hui moins utilisé.

Les presses à forger comportent un vérin mécanique ou hydraulique permettant de façonner la pièce d'un seul coup, lent et contrôlé (voir figure 82.1). Cette opération appelée matriçage est généralement commandée automatiquement. Elle peut être effectuée à chaud ou à température normale (matriçage à froid, extrusion). Une variante du forgeage à froid est représentée par le roulage où la pièce subit des pressions répétées pendant que l'opérateur de la machine la fait tourner.

Des lubrifiants sont pulvérisés ou appliqués de diverses manières sur les matrices et les flans avant chaque passe.

Les pièces de machine à haute résistance telles qu'arbres, couronnes de différentiel, éléments de visserie et composants de la suspension des véhicules sont autant de produits en acier forgé

Figure 82.1 • Presse à forger



bien connus. Les composants à haute résistance utilisés en aéronautique tels que longerons d'aile, disques de turbine et éléments des trains d'atterrissage sont forgés en aluminium, titane ou alliages de nickel et d'acier. Environ 3% des travailleurs de l'automobile travaillent à la forge.

### Les conditions de travail

Bon nombre des risques propres à l'industrie lourde se retrouvent dans les opérations d'estampage et de forgeage. C'est le cas des pathologies d'hypersollicitation liées à la manutention et au traitement répétés des pièces, ainsi qu'à la manœuvre de commandes de machines telles que les boutons-poussoirs en champignon. La manipulation de pièces lourdes expose les travailleurs à des problèmes de dos et des épaules ainsi qu'à des troubles musculo-squelettiques affectant les membres supérieurs. Dans l'industrie automobile, les opérateurs de presse des ateliers d'emboutissage présentent des taux de pathologies d'hypersollicitation comparables à ceux des travailleurs des chaînes de montage occupant des emplois à haut risque. La plupart des opérations d'emboutissage et certains travaux de forgeage (au marteau-pilon à vapeur ou au marteau à air comprimé, par exemple) s'accompagnent de vibrations et de bruits à forte intensité impulsionnelle, qui engendrent un risque de déficit auditif et, éventuellement, des maladies cardio-vasculaires; il s'agit ici d'établissements industriels à classer parmi les plus bruyants (plus de 100 dBA). Comme dans d'autres formes de systèmes automatisés, la dépense énergétique du travailleur peut être élevée, selon les pièces à manipuler et la cadence des machines.

Des accidents très graves, résultant de mouvements non prévus de la machine, ne sont pas rares dans les ateliers d'emboutissage et de forgeage. Ils peuvent avoir les causes suivantes: 1) défaillance mécanique des systèmes de commande, notamment des mécanismes d'embrayage, à des moments où les travailleurs sont censés, de par leur tâche, se trouver dans la zone de travail de la machine (ce qui constitue un vice de conception inacceptable); 2) défauts de conception ou de fonctionnement des machines qui amènent le travailleur à procéder à des interventions imprévues (pour déplacer des pièces coincées ou mal centrées, par exemple); ou 3) procédures d'entretien inadéquates, à haut risque, exécutées sur une machine sans consignation efficace de tout l'ensemble mécanique en cause, y compris des automatismes de transfert des pièces et des fonctions d'autres machines reliées à la première. La plupart des machines automatisées fonctionnant en réseau ne sont pas configurées pour permettre une consignation rapide et efficace ou un dépannage sans danger.

Les brouillards d'huiles générés par le fonctionnement normal des machines constituent un autre risque professionnel propre aux presses d'emboutissage et de forgeage à air comprimé; ils exposent en effet les travailleurs à un risque de maladies respiratoires, cutanées et digestives.

### Les problèmes de sécurité et de santé

#### L'emboutissage

Les opérations d'emboutissage présentent un risque élevé de graves lacerations lié à la nécessité de manipuler des pièces à arêtes coupantes. La manipulation des chutes ou tombées de coupes peut s'avérer encore plus dangereuse. Les chutes sont généralement évacuées par gravité au moyen de plans inclinés et de transporteurs sur lesquels il est particulièrement dangereux d'intervenir pour remédier à un bourrage.

Pour ce qui concerne les risques chimiques spécifiques à l'emboutissage, ils tiennent essentiellement à deux causes: d'une part, les graisses d'emboutissage (c'est-à-dire les lubrifiants de matrice) lors des opérations à la presse proprement dites et, d'autre part, les émissions de soudage au cours de l'assemblage des pièces embouties. La plupart des opérations d'emboutissage requièrent des grais-

ses qui sont appliquées sur la tôle par pulvérisation ou au rouleau, l'opération d'emboutissage proprement dite produisant en outre des émissions sous forme de brouillards. Comme les autres liquides utilisés pour le travail des métaux, les lubrifiants d'emboutissage peuvent être des huiles entières ou des émulsions (huiles solubles). Parmi leurs composants figurent des fractions d'huile de pétrole, des lubrifiants spéciaux (dérivés d'acides gras d'origine animale ou végétale, huiles chlorées et cires, par exemple), des alcanolamines, des sulfonates de pétrole, des borates, des épaississants celluloseux, des inhibiteurs de corrosion et des biocides. En emboutissage, les concentrations en aérosols dans l'atmosphère peuvent atteindre celles observées autour des machines-outils classiques, tout en étant en moyenne moins élevées (0,05 à 2 mg/m<sup>3</sup>). Pourtant, on observe souvent la présence de brouillards visibles et de pellicules d'huile accumulées sur les surfaces des bâtiments, et la manipulation répétée des pièces peut augmenter le risque de contact cutané. Les expositions les plus susceptibles de comporter des risques sont celles aux huiles chlorées (risque de cancer, de maladies hépatiques, d'affections cutanées), à la colophane ou aux dérivés d'acides gras de tallöl (sensibilisants), aux fractions de pétrole (cancers des voies digestives), éventuellement aussi au formaldéhyde (contenu dans des biocides) et aux nitrosamines (provenant des alcanolamines et du nitrite de sodium présents dans les graisses d'emboutissage ou les produits de protection de surface des aciers livrés à l'usine). Des taux élevés de cancer des voies digestives ont été observés dans deux ateliers d'emboutissage de pièces d'automobiles. Des proliférations microbiennes dans les systèmes d'application au rouleau des graisses d'emboutissage sur la tôle d'acier à partir d'un réservoir ouvert peuvent faire courir aux travailleurs des risques de maladies respiratoires et cutanées analogues à celles rencontrées dans les opérations d'usinage.

Le soudage des pièces embouties est souvent exécuté dans les ateliers d'emboutissage, le plus souvent sans lavage intermédiaire. Il en résulte des émissions comprenant des fumées métalliques ainsi que des produits de pyrolyse et de combustion provenant du lubrifiant d'emboutissage et d'autres résidus présents sur les surfaces. En général, les travaux de soudage (par résistance surtout) dans ces ateliers produisent des concentrations en particules totales comprises entre 0,05 et 4 mg/m<sup>3</sup>. La teneur en métaux (sous forme de fumées et d'oxydes) représente généralement moins de la moitié de ces émissions, d'où il ressort que des résidus chimiques assez mal caractérisés peuvent représenter des concentrations de 2 mg/m<sup>3</sup>. C'est ce qui explique qu'il se forme un brouillard visible autour de nombreux postes de soudage situés dans les ateliers d'emboutissage. La présence de dérivés chlorés et d'autres substances organiques est une bonne raison de s'inquiéter quant à la composition des fumées de soudage dans ces ateliers et plaide fortement pour la mise en place de moyens de ventilation. L'application d'autres matériaux avant le soudage (tels que couche de fond, peinture et adhésifs du type époxy), qui restent en place pendant le soudage, ne fait que rendre le problème plus préoccupant. Les réparations de la production soudée, généralement effectuées à la main, occasionnent souvent des expositions encore plus élevées à ces mêmes contaminants de l'air. Des taux de cancer du poumon excédentaires ont été observés parmi les soudeurs d'un atelier d'emboutissage d'usine automobile.

#### Le forgeage

Comme l'emboutissage, le forgeage peut s'accompagner de risques élevés de coupures lorsque les travailleurs ont à manipuler des pièces forgées ou à les ébavurer. Le forgeage à haute énergie peut également causer des projections de métal, de calamine ou d'outils qui causent des blessures. Dans certains cas, le travailleur est amené à saisir la pièce à forger au moyen de tenailles durant les passes de pressage ou de frappe, d'où un risque accru de troubles musculo-squelettiques. A la forge, à la différence de ce

qui se passe dans les ateliers d'emboutissage, les fours destinés à chauffer les pièces (pour le forgeage et le recuit) ainsi que les bennes où sont recueillies les pièces forgées à chaud sont généralement situés à proximité, ce qui entraîne un risque important de coup de chaleur, encore accru par la charge métabolique du poste de travail imposée au travailleur par la manutention des matériaux et, dans certains cas, par la chaleur dégagée par les produits de combustion des lubrifiants de matrices issus du pétrole.

La lubrification des matrices, indispensable dans la plupart des travaux de forge, présente en plus l'inconvénient du contact direct du lubrifiant avec des pièces à haute température, ce qui cause une pyrolyse et une aérosolisation immédiates, non seulement dans les matrices mais aussi, ensuite, sur les pièces placées dans les bennes de refroidissement. Les lubrifiants de matrices employés en forgeage peuvent contenir du graphite, des épaississants polymériques, des émulsifiants sulfonés, des fractions de pétrole, du nitrate de sodium, des nitrites de sodium, du carbonate de sodium, du silicate de sodium, des huiles de silicone et des biocides. Ces lubrifiants sont appliqués par pulvérisation ou, dans certains cas, avec un tampon. Les fours destinés à chauffer les métaux à forger fonctionnent généralement au mazout ou au gaz, à moins qu'il ne s'agisse de fours à induction. Les fours au mazout ayant un mauvais tirage et les fours à induction non ventilés risquent de produire des émissions lorsque le métal présente à l'arrivée des contaminants superficiels, tels que de l'huile ou des inhibiteurs de corrosion ou si, avant le forgeage, il a été lubrifié en vue du cisailage ou du sciage (comme dans le cas des barres marchandes). Aux États-Unis, les concentrations totales en particules atmosphériques dans les opérations de forgeage sont généralement comprises entre 0,1 et 5 mg/m<sup>3</sup>; elles varient considérablement selon les cas du fait des courants de convection thermique. On a observé un taux élevé de cancer du poumon chez les travailleurs de deux usines de roulements à billes affectés à la forge et au traitement thermique.

### Les pratiques de sécurité et de santé

Peu d'études ont été effectuées concernant les effets sur la santé des travailleurs lors des opérations d'emboutissage ou de forgeage. La caractérisation globale du potentiel toxique de la plupart des opérations courantes, à commencer par l'identification et le mesurage des principaux agents toxiques, n'a pas été réalisée. Ce n'est que récemment qu'il est devenu possible d'évaluer les effets pathologiques à long terme des techniques de lubrification des matrices mises au point dans les années soixante et soixante-dix. De ce fait, la réglementation de ces expositions s'appuie par défaut sur des normes génériques relatives aux poussières ou aux particules totales, comme c'est le cas aux États-Unis avec un taux de 5 mg/m<sup>3</sup>. Si cette norme est probablement suffisante dans certains cas, il reste à démontrer qu'elle l'est pour de nombreuses applications en emboutissage et en forgeage.

En adoptant des pratiques d'application améliorées, il est possible de réduire quelque peu les concentrations de brouillards de lubrifiants de matrices tant en emboutissage qu'en forgeage. Ainsi, dans le premier cas, il est préférable de recourir à l'application au rouleau quand la chose est faisable et d'employer une pression d'air minimale pour les pulvérisations. Toute solution d'élimination des substances les plus nocives devrait être étudiée. Les enceintes à dépression et les collecteurs de brouillards peuvent être extrêmement efficaces, mais ils ne sont pas toujours compatibles avec la manipulation des pièces. Le filtrage de l'air rejeté par les systèmes à haute pression dont sont équipées les presses permettrait de réduire les émissions de brouillard d'huile (et le bruit). L'automatisation et le port de bons vêtements de protection individuelle, protégeant des coupures et de l'imprégnation par les liquides, peuvent réduire les contacts cutanés lors des opérations d'emboutissage. S'agissant du soudage dans les ateliers d'embou-

tissage, le lavage des pièces avant soudage est extrêmement souhaitable, tandis que des enceintes partielles à aspiration localisée permettront de réduire notablement les niveaux de fumées.

Parmi les mesures permettant de réduire les coups de chaleur dus aux opérations d'emboutissage et de forgeage à chaud, on peut citer celles qui consistent à diminuer le nombre nécessaire de manipulations des pièces dans les zones où il règne une forte chaleur, à placer des écrans devant les fours pour limiter le rayonnement thermique, à réduire la hauteur des portes et des ouvertures des fours et à utiliser des ventilateurs pour le refroidissement. Le choix des emplacements des ventilateurs doit faire partie intégrante de l'étude des flux de circulation d'air destinée à limiter les expositions aux vapeurs d'huile et les coups de chaleur, faute de quoi le refroidissement pourrait être obtenu au prix d'expositions encore plus élevées.

La mécanisation des opérations de manutention, le passage chaque fois que possible du forgeage au marteau au forgeage à la presse et l'adaptation des cadences de travail aux règles de l'ergonomie sont de nature à réduire le nombre des troubles musculo-squelettiques.

Les niveaux sonores peuvent être abaissés au moyen d'un ensemble de mesures: remplacement du marteau-pilon par la presse lorsque c'est réalisable, encoffrements bien conçus et insonorisation des souffleries, des embrayages pneumatiques, des conduites d'air et des équipements de manutention des pièces. Un programme de préservation de l'ouïe sera institué.

L'équipement de protection individuelle comprendra une protection de la tête, des chaussures de travail, des lunettes spéciales, des casques antibruit (à proximité des zones les plus bruyantes), des tabliers à l'épreuve de la chaleur et des projections d'huile, des guêtres (en cas d'utilisation importante de lubrifiants de matrices à base de pétrole) ainsi que des protections des yeux et du visage contre le rayonnement infrarouge (à proximité des fours).

### Les risques pour l'environnement

Les risques pour l'environnement imputables aux ateliers d'emboutissage, qui sont relativement mineurs par rapport à ceux d'autres usines, comprennent l'élimination des graisses d'emboutissage usées et des eaux de lavage, ainsi que l'évacuation des fumées de soudage sans épuration préalable. Par le passé, certaines forges ont été localement à l'origine d'une dégradation notoire de la qualité de l'air, du fait des émissions de fumées de forge et de poussières de calamine. A condition de mettre en œuvre les moyens d'épuration nécessaires, la chose ne devrait plus se produire. Cependant, un autre problème qui risque de se présenter est celui de l'élimination des ferrailles d'emboutissage et de la calamine de forge contenant des lubrifiants.

## LE SOUDAGE ET LE DÉCOUPAGE THERMIQUE DES MÉTAUX

Philip A. Platcow et G.S. Lyndon\*

### Généralités

Par *soudage*, on entend de manière générale l'opération consistant à assembler de façon permanente par différents procédés des pièces métalliques dont les surfaces de contact ont été rendues plastiques ou liquides sous l'effet de la chaleur ou de la pression, ou des deux à la fois. La chaleur nécessaire est ordinairement fournie par trois sources directes, à savoir:

\* Cet article est une adaptation de l'article «Welding and thermal cutting», de G.S. Lyndon, publié dans la 3e édition de l'*Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*.

Tableau 82.6 • Description et risques des procédés de soudage

Procédés de soudage	Description	Risques
<b>Soudage et découpage au gaz</b>		
Soudage	Le chalumeau fait fondre la surface métallique et la baguette d'apport, ce qui réalise le joint soudé	Fumées métalliques, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, bruit, brûlures, rayonnement infrarouge, incendie, explosions
Brasage	Il se produit un joint entre les deux surfaces métalliques sans fusion du métal. La température de fusion du métal d'apport est supérieure à 450 °C. La chaleur est obtenue à la flamme, par résistance ou par induction	Fumées métalliques (notamment cadmium), fluorures, incendie, explosions, brûlures
Brasage tendre	Comme ci-dessus, à la différence que la température de fusion du métal d'apport est inférieure à 450 °C. On utilise aussi un fer à souder pour le chauffage	Flux de brasage, fumées de plomb, brûlures
Découpage des métaux et gougeage au chalumeau	Dans l'une des variantes du procédé, le métal est chauffé à la flamme, tandis qu'un jet d'oxygène pur est appliqué au point de découpe et déplacé le long de la ligne à découper. Le gougeage au chalumeau enlève une bande de métal en surface, sans traverser la pièce	Fumées métalliques, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, bruit, brûlures, rayonnement infrarouge, incendie, explosions
Soudage par compression au gaz	Les pièces comprimées sont chauffées par des jets de gaz; on obtient une soudure par forgeage	Fumées métalliques, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, bruit, brûlures, rayonnement infrarouge, incendie, explosions
<b>Soudage à l'arc sous flux protecteur</b>		
Soudage à l'arc avec électrode enrobée; soudage à l'arc avec baguette; soudage à l'arc manuel; soudage à l'arc ouvert	On utilise une électrode fusible constituée d'une âme métallique revêtue d'un flux	Fumées métalliques, fluorures (notamment avec des électrodes à faible dégagement d'hydrogène), rayonnement infrarouge et ultraviolet, brûlures, risques électriques, incendie, bruit, ozone, dioxyde d'azote
Soudage à l'arc submergé	Une couche de flux en poudre est déposée sur la pièce avant le dévidage du fil électrode en métal nu fusible. L'arc fait fondre le flux qui forme un laitier protégeant la zone de l'arc de l'attaque des agents atmosphériques	Fluorures, incendie, brûlures, rayonnement infrarouge, risques électriques, fumées métalliques, bruit, rayonnement ultraviolet, ozone, dioxyde d'azote
<b>Soudage à l'arc sous protection gazeuse</b>		
Soudage sous atmosphère de gaz inerte; soudage à l'arc avec fil électrode sous mélange gazeux	On emploie normalement un fil électrode de composition similaire à celle du métal à souder; le dévidage du fil électrode est automatisé	Rayonnement ultraviolet, fumées métalliques, ozone, monoxyde de carbone (en cas de soudage sous CO <sub>2</sub> ), dioxyde d'azote, incendie, brûlures, rayonnement infrarouge, risques électriques, fluorures, bruit
Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode tungstène; soudage à l'arc avec électrode tungstène et mélange gazeux; soudage Heliarc	L'électrode de tungstène est non fusible; le métal d'apport fusible est introduit manuellement dans l'arc	Rayonnement ultraviolet, fumées métalliques, ozone, dioxyde d'azote, incendie, brûlures, rayonnement infrarouge, risques électriques, bruit, fluorures, monoxyde de carbone
Soudage à l'arc plasma et métallisation à l'arc plasma; découpage à l'arc tungstène	Semblable au soudage en atmosphère inerte avec électrode tungstène, à la différence que l'arc et le courant de gaz inerte passent par un orifice étroit avant d'atteindre la pièce à souder, ce qui crée un «plasma» de gaz fortement ionisé pouvant atteindre des températures supérieures à 33 400 °C. Également utilisé pour la métallisation	Fumées métalliques, ozone, dioxyde d'azote, rayonnement ultraviolet et infrarouge, bruit, incendie, brûlures, risques électriques, fluorures, monoxyde de carbone et, éventuellement, rayons X
Soudage à l'arc au fil fourré; soudage sous atmosphère de gaz actif	On utilise une électrode fusible à âme décapante; peut être complétée par une atmosphère protectrice de dioxyde de carbone (soudage sous atmosphère de gaz actif)	Rayonnement ultraviolet, fumées métalliques, ozone, monoxyde de carbone (en cas de soudage sous CO <sub>2</sub> ), dioxyde d'azote, incendie, brûlures, rayonnement infrarouge, risques électriques, fluorures, bruit

Suite au verso.

Tableau 82.6 • Description et risques des procédés de soudage

Procédés de soudage	Description	Risques
<b>Soudage par résistance électrique</b>		
Soudage par résistance (par points, à la molette, par bossages ou bout à bout par rapprochement)	Un courant de forte intensité et de faible tension circulant entre deux électrodes traverse les deux pièces. La chaleur produite dans la zone de contact entre les surfaces des pièces porte celles-ci à température de soudage. Pendant le passage du courant, les électrodes exercent une pression permettant d'obtenir une soudure par forgeage, sans flux ni métal d'apport	Ozone, bruit (parfois), risques mécaniques, incendie, brûlures, risques électriques, fumées métalliques
Soudage vertical sous laitier	Utilisé pour le soudage vertical bout à bout. Les pièces à souder, disposées verticalement, sont séparées par un espace fermé latéralement de part et d'autre par des flasques ou sabots de cuivre destinés à contenir le bain de fusion. Un arc est établi sous une couche de flux entre un ou plusieurs fils électrodes dévidés en continu et l'une des pièces métalliques. Il se forme à l'abri du laitier fondu un bain de métal dont la fusion est entretenue par sa résistance au passage du courant circulant entre l'électrode et les pièces. La chaleur générée par l'effet Joule provoque la fusion des bords du joint et du fil électrode de façon à remplir le joint et à réaliser la soudure. A mesure que l'opération progresse, on élève les flasques de cuivre pour maintenir en position le bain de fusion et le laitier	Brûlures, incendie, rayonnement infrarouge, risques électriques, fumées métalliques
Soudage par étincelage	Les deux pièces métalliques à souder sont reliées à une source de courant à basse tension et à haute intensité. Lorsque les extrémités des pièces sont mises en contact l'une avec l'autre, il passe un courant de très forte intensité qui, en produisant des «étincelles», porte les bords à la température de soudage. On obtient alors, en exerçant une pression, une soudure par forgeage	Risques électriques, brûlures, incendie, fumées métalliques
<b>Autres procédés de soudage</b>		
Soudage par bombardement électronique	Une pièce placée dans une enceinte sous vide est bombardée par un faisceau d'électrons émis par un canon sous des tensions élevées. Au contact de la pièce à souder, l'énergie cinétique des électrons se transforme en chaleur, ce qui fait fondre le métal et réalise le joint soudé	Rayons X sous des tensions élevées, risques électriques, brûlures, poussières métalliques, espaces confinés
Découpage arc-air	L'arc jaillit entre l'extrémité d'une électrode en carbone (maintenue dans un porte-électrode manuel comportant sa propre alimentation en air comprimé) et la pièce à découper. Le métal mis en fusion est chassé par des jets d'air comprimé	Fumées métalliques, monoxyde de carbone, dioxyde d'azote, ozone, incendie, brûlures, rayonnement infrarouge, risques électriques
Soudage par friction	Il s'agit d'une technique purement mécanique dans laquelle l'une des pièces est fixe tandis que l'autre, appliquée contre elle par compression, est animée d'un mouvement de rotation. Lorsque la chaleur produite par le frottement a porté les pièces à la température de forgeage, la rotation est arrêtée et la soudure réalisée par pression	Chaleur, brûlures, risques mécaniques
Soudage et perçage au laser	Des faisceaux de rayons laser sont utilisés pour le soudage et le perçage dans des applications industrielles exigeant une précision exceptionnelle (montages miniaturisés et micro-techniques dans l'industrie électronique, filières pour l'industrie des fibres synthétiques). Le faisceau laser fait fondre les pièces et en réalise la soudure	Risques électriques, rayonnement laser, rayonnement ultraviolet, incendie, brûlures, fumées métalliques, produits de la décomposition des revêtements des pièces
Soudage des goujons	Un arc s'établit entre un goujon métallique (jouant le rôle d'électrode), maintenu dans un pistolet à souder les goujons, et la plaque métallique à souder, portant ainsi la température des bords des pièces jusqu'au point de fusion. Le goujon se trouve comprimé contre la plaque et y reste soudé. Une virole en céramique entourant le goujon sert d'écran	Fumées métalliques, rayonnement infrarouge et ultraviolet, brûlures, risques électriques, incendie, bruit, ozone, dioxyde d'azote

Tableau 82.6 • Description et risques des procédés de soudage

Procédés de soudage	Description	Risques
<b>Autres procédés de soudage</b>		
Soudage alumino-thermique	A l'aide d'une poudre spéciale, on allume dans un creuset un mélange d'aluminium et d'oxydes métalliques (fer, cuivre, etc.) pulvérulents. La réduction des oxydes dégage une chaleur intense. Le creuset est alors vidé par soutirage et le métal en fusion coule dans le joint (entouré d'un moule en sable). Ce procédé est fréquemment employé pour réparer des pièces moulées ou forgées	Incendie, explosions, rayonnement infrarouge, brûlures

1. la flamme produite par la combustion d'un gaz en présence d'air ou d'oxygène;
2. l'arc électrique qui s'établit entre une électrode et la pièce, ou entre deux électrodes;
3. la résistance électrique s'opposant au passage du courant entre deux ou plusieurs pièces.

Les autres sources de chaleur employées pour le soudage sont traitées ci-après (voir tableau 82.6).

Dans le procédé de *soudage et découpage au gaz*, l'oxygène ou l'air sont amenés en même temps qu'un gaz combustible dans un appareil appelé chalumeau, généralement tenu à la main (voir figure 82.2), dans lequel ils sont mélangés avant de parvenir à la buse terminale où a lieu la combustion. La chaleur dégagée fait fondre les surfaces des pièces métalliques entre lesquelles se réalise

alors le joint soudé. L'opération s'effectue souvent avec apport d'un métal ou d'un alliage dont le point de fusion est en principe inférieur à celui des pièces à souder. Dans ce cas, celles-ci ne sont généralement pas portées à la température de fusion; il s'agit alors de brasage ou soudure tendre. On peut utiliser des flux chimiques pour empêcher l'oxydation et faciliter la formation du joint.

Dans le soudage à l'arc, l'arc électrique s'établit entre une électrode et les pièces à souder. L'électrode peut être reliée soit à une source de courant alternatif, soit à une source de courant continu. La fusion a lieu aux environs de 4 000 °C. L'apport de métal fondu généralement nécessaire à l'obtention du joint est réalisé en faisant fondre soit l'électrode elle-même (procédés dits à électrode fusible), soit une baguette métallique non parcourue par le courant (procédés à électrode non fusible).

Dans la plupart des cas, le soudage à l'arc de type classique est effectué à la main, au moyen d'une électrode fusible enrobée tenue par l'opérateur à l'aide d'un porte-électrode. Il existe également de nombreux procédés électriques, automatiques ou semi-automatiques, comme le soudage par résistance ou avec dévidage continu d'un fil électrode.

Au cours du soudage, la région à souder doit être protégée de l'atmosphère ambiante de façon à empêcher l'oxydation et les inclusions. Il existe deux types de protection: les revêtements par flux protecteurs et la protection par atmosphère gazeuse inerte. Dans le *soudage à l'arc sous flux protecteur*, l'électrode fusible se compose d'une âme métallique enrobée d'un flux, généralement constitué d'un mélange complexe de composants minéraux et autres. A mesure que l'opération de soudage progresse, le flux fond en recouvrant de laitier le métal en fusion tout en enveloppant la région du soudage d'une atmosphère gazeuse protectrice (dioxyde de carbone, par exemple) qui se dégage du flux chauffé. Après le soudage, le laitier doit être éliminé, le plus souvent par piquage au marteau.

Dans le *soudage à l'arc sous protection gazeuse*, une nappe de gaz inerte évite tout contact avec l'air ambiant afin d'empêcher l'oxydation et les inclusions pendant le soudage. Les gaz inertes les plus couramment utilisés sont l'argon, l'hélium, l'azote ou le dioxyde de carbone. Le choix du gaz dépend de la nature des matériaux à souder. Les deux formes les plus répandues de soudage à l'arc sous protection gazeuse sont le soudage sous atmosphère inerte avec électrode métallique (Metal Inert Gas (MIG)) et avec électrode de tungstène (Tungsten Inert Gas (TIG)).

Le *soudage par résistance électrique* fait appel à la résistance électrique qui s'oppose au passage d'un courant de forte intensité et de faible tension entre les pièces à souder pour produire la chaleur qui fera fondre le métal. L'échauffement ainsi réalisé à l'interface entre les pièces porte celles-ci à la température de soudage.

### Les risques et leur prévention

Tous les travaux de soudage comportent des risques d'incendie, de brûlures, d'exposition à une chaleur rayonnante (rayonnement



Le soudeur est protégé par un tablier de cuir, des gants à crispin et des lunettes.

infrarouge) et d'inhalation de fumées métalliques et d'autres contaminants. Il existe d'autres sources de dangers liés à des procédés de soudage spécifiques, comme les risques électriques, le bruit, le rayonnement ultraviolet, l'ozone, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone, les fluorures, l'utilisation de bouteilles de gaz comprimé et les explosions. Pour plus de détails, se reporter au tableau 82.6.

Dans bien des cas, les travaux de soudage ne sont pas effectués dans des ateliers, où l'on peut normalement prendre les précautions d'usage, mais sur le terrain, notamment lors de la construction ou de la réparation d'ouvrages et d'appareillages de grandes dimensions (ossatures de bâtiments, ponts et tours métalliques, navires, motrices et véhicules ferroviaires, matériel lourd, par exemple). Le soudeur peut être amené à apporter à pied d'œuvre tout son matériel, à le mettre en place et à intervenir dans un espace confiné ou sur un échafaudage. Le fait d'avoir à travailler à bras tendus, agenouillé ou dans d'autres positions plus ou moins acrobatiques et inconfortables peut être à l'origine de crampes, de grande fatigue ou de troubles musculo-squelettiques. Outre la chaleur produite par le soudage proprement dit, le fait d'avoir à travailler par temps chaud et sous une combinaison protectrice est de nature à causer un coup de chaleur.

### Les bouteilles de gaz comprimé

Dans les installations de soudage au gaz à haute pression, le chalumeau est alimenté en oxygène et en gaz combustible (acétylène, hydrogène, gaz de ville, propane) à partir de bouteilles à haute pression. On trouvera ailleurs dans l'*Encyclopédie* un exposé détaillé des risques graves d'incendie et d'explosion, ainsi que les règles de sécurité à observer pour garantir la sécurité d'emploi et de stockage des gaz combustibles. Il convient en tout cas d'observer les précautions ci-après :

- seuls devraient être montés sur des bouteilles de gaz les régulateurs de pression ou les détendeurs spécialement destinés au gaz contenu dans la bouteille. En particulier, il ne devrait pas être utilisé pour le gaz de houille ou l'hydrogène un détendeur prévu pour l'acétylène (chose qui est en revanche possible pour le propane);
- les chalumeaux doivent être entretenus en bon état de marche et nettoyés à intervalles réguliers; pour le nettoyage du bec, on devrait utiliser uniquement une baguette de bois dur ou un fil de laiton souple. Ils devraient être reliés au détendeur par des tuyaux flexibles armés spéciaux qu'on placera de manière qu'ils ne risquent pas d'être endommagés;
- les bouteilles d'oxygène et d'acétylène doivent être entreposées séparément, dans des locaux résistant au feu et ne contenant aucun matériau inflammable; elles doivent être disposées de façon à pouvoir être évacuées sans difficulté en cas d'incendie. La réglementation locale en matière de sécurité des bâtiments et d'incendie doit être consultée;
- les codes de couleurs, obligatoires ou recommandés, pour identifier le contenu des bouteilles et les accessoires devraient être scrupuleusement respectés. Dans de nombreux pays, ces codes sont conformes à ceux adoptés à l'échelle internationale pour le transport des matières dangereuses. Le souci de la sécurité ainsi que le développement des migrations internationales de travailleurs de l'industrie sont des arguments convaincants en faveur de l'application des règles internationales dans ce domaine.

### Les générateurs d'acétylène

L'acétylène employé dans le procédé à basse pression est généralement produit dans des générateurs par décomposition du carbure de calcium par l'eau. Le gaz est ensuite amené grâce à un tuyau au chalumeau soudeur ou découpeur alimenté par ailleurs en oxygène.

Les générateurs fixes devraient être installés soit en plein air, soit dans un bâtiment bien ventilé, indépendant des ateliers principaux. La ventilation du local abritant le générateur devrait être suffisante pour empêcher la formation d'une atmosphère explosive ou toxique. Un éclairage satisfaisant devrait être assuré; les interrupteurs et autres appareils électriques ainsi que les lampes devraient être placés à l'extérieur du local, ou à défaut, être de type antidéflagrant. Il doit être impérativement interdit de fumer dans le local abritant un générateur d'acétylène ou à proximité de l'appareil s'il se trouve à l'air libre. La présence de flammes, chalumeaux, matériel de soudage ou matières inflammables doit y être également interdite. Un grand nombre de ces précautions concernent aussi les générateurs transportables, qui devraient être utilisés, nettoyés ou rechargés uniquement en plein air ou dans un atelier bien ventilé, loin de toute matière inflammable.

Le carbure de calcium est livré en fûts métalliques hermétiquement fermés, que l'on devrait stocker toujours au sec sur une plate-forme surélevée évitant tout contact avec le sol. Les fûts doivent être entreposés sous abri; la cloison séparant le lieu de stockage d'un éventuel bâtiment adjacent doit être coupe-feu. La ventilation du local devrait se faire de préférence par le toit. Les fûts devraient être ouverts juste avant le chargement du générateur à l'aide d'un outil spécial fourni par le fabricant; on ne devrait jamais employer de marteau ou de burin pour ouvrir les fûts. Il est dangereux de laisser les fûts de carbure de calcium exposés à l'humidité, quelle qu'en soit l'origine.

Avant le démontage d'un générateur, tout le carbure de calcium doit en être extrait; l'appareil sera ensuite rempli d'eau qu'on devrait laisser séjourner pendant au moins une demi-heure pour éliminer toute trace de gaz. Le démontage et l'entretien devraient être confiés exclusivement au fabricant ou à un spécialiste. En cas de recharge ou de nettoyage d'un générateur, il est rigoureusement exclu de réutiliser tout ou partie de l'ancienne charge.

Les morceaux de carbure de calcium coincés dans le mécanisme d'alimentation ou adhérant à des pièces du générateur devraient être soigneusement enlevés à l'aide d'outils antiétincelants, en bronze ou en d'autres alliages non ferreux.

Toutes les personnes appelées à utiliser le matériel devraient avoir parfaitement assimilé les instructions du fabricant qui devraient être affichées en bonne place. Il y a également lieu d'observer les précautions ci-après :

- un clapet antiretour dûment conçu pour cet usage doit être monté entre le générateur et chaque chalumeau de manière à empêcher les retours de flamme ou de gaz. L'état de ce clapet devrait être contrôlé après chaque retour de flamme et le niveau d'eau vérifié quotidiennement;
- seuls des chalumeaux du type à injecteur conçus pour fonctionner à basse pression devraient être utilisés. Pour chauffer et découper, le gaz de ville ou l'hydrogène à basse pression sont parfois employés. Une soupape de retenue devrait alors être placée entre chaque chalumeau et la canalisation d'alimentation;
- lorsque la buse du chalumeau vient à plonger dans le métal fondu ou qu'elle est obstruée par tout autre corps étranger (boue, peinture), il peut se produire un retour de flamme causant une explosion. Les particules de laitier ou de métal adhérant à l'extrémité de la buse devraient donc être enlevées immédiatement; la buse devrait être par ailleurs fréquemment refroidie;
- la réglementation locale en matière d'incendie et de sécurité des bâtiments devrait être consultée.

### La prévention des incendies et des explosions

S'agissant du choix des emplacements de soudage, il importe de porter la plus grande attention aux murs, cloisons et planchers adjacents, ainsi qu'aux objets ou déchets situés à proximité; les mesures ci-après devraient être appliquées :

- tous les matériaux combustibles doivent être enlevés ou protégés convenablement par des tôles; il ne devrait jamais être utilisé à cet effet de toiles goudronnées;
- les ouvrages en bois devraient être proscrits ou, si cela n'est pas possible, être protégés de la même manière. Les planchers en bois devraient être évités;
- des précautions devraient être prises au cas où il existe des ouvertures ou des fissures dans les murs et les planchers; les matériaux inflammables qui se trouvent dans des pièces voisines ou à l'étage inférieur devraient être évacués en lieu sûr. La réglementation locale en matière de sécurité des bâtiments et d'incendie devrait être consultée;
- un matériel d'extinction approprié devrait toujours être tenu à portée de la main. S'il s'agit d'une installation à basse pression avec générateur d'acétylène, il devrait être stocké à proximité de seaux remplis de sable sec. Des extincteurs à poudre sèche ou à dioxyde de carbone sont appropriés. Par contre, il ne doit jamais être employé d'eau;
- il peut s'avérer nécessaire de prévoir un piquet d'incendie. S'il y a un risque d'incendie, une personne responsable devrait être désignée pour surveiller les lieux pendant au moins une demi-heure après la fin du travail afin de détecter tout début d'incendie;
- étant donné qu'il y a un risque d'explosion dès lors que de l'acétylène est présent dans l'air en toute proportion comprise entre 2 et 80%, il conviendra de prévoir une bonne ventilation et de détecter soigneusement toute fuite de gaz. Seule l'eau savonneuse devrait être utilisée à cette fin;
- l'oxygène doit faire l'objet de précautions très strictes. Par exemple, de l'oxygène ne devrait jamais être libéré dans l'atmosphère d'un local exigu, car sa présence accroît considérablement le risque d'inflammation de nombreux métaux, de vêtements et d'autres objets. En oxycoupage, l'oxygène non consommé se dégage dans l'atmosphère. C'est pourquoi cette opération ne devrait en aucun cas être effectuée dans un local exigu sans que des dispositions aient été prises pour en assurer la ventilation adéquate;
- les alliages riches en magnésium ou autres métaux combustibles devraient être tenus éloignés de la flamme ou des arcs de soudage;
- le soudage de récipients peut s'avérer extrêmement dangereux. Tout récipient dont le contenu antérieur n'est pas connu devrait être traité comme ayant renfermé des matières inflammables. On peut empêcher les explosions soit en enlevant du récipient toutes les matières inflammables qu'il pourrait contenir, soit en les rendant non explosives et ininflammables;
- le mélange d'aluminium et d'oxyde de fer utilisé pour le soudage aluminothermique est stable dans des conditions normales. Cependant, étant donné la facilité avec laquelle la poudre d'aluminium s'enflamme et la nature quasi explosive de la réaction, des précautions appropriées devraient être prises pour la manutention et le stockage (toute exposition du mélange à une chaleur élevée et à des sources possibles d'inflammation doit être évitée);
- certaines réglementations locales soumettent les travaux de soudage à l'obligation de présenter un programme écrit (permis de feu) pour tous travaux par points chauds, spécifiant les précautions à prendre et les procédures à respecter pendant le soudage, le découpage, le brûlage, etc. Ce programme devrait répertorier les opérations spécifiques à effectuer ainsi que les précautions à prendre. Il doit s'appliquer à un établissement donné et peut comporter un système de demande d'autorisation interne à remplir pour chaque opération.

#### **La protection contre la chaleur et les risques de brûlures**

Le contact avec le métal brûlant et les projections de particules métalliques incandescentes ou de métal en fusion comportent des

risques de brûlures pour les yeux et les parties découvertes du corps. Dans le cas du soudage à l'arc, l'étincelle à haute fréquence qui sert à amorcer l'arc électrique peut causer des brûlures peu étendues, mais profondes, si ses effets se concentrent en un point de la peau. La chaleur et la lumière intenses rayonnées par le soudage au gaz ou par la flamme oxyacétylénique et par le métal incandescent du bain de fusion peuvent être pénibles pour l'opérateur et les personnes se trouvant à proximité du poste de travail. Chaque opération devrait donc être préparée à l'avance de façon à étudier et à mettre en œuvre les précautions nécessaires. Des lunettes spécialement adaptées au soudage et à l'oxycoupage devraient être portées pour protéger les yeux de la chaleur et de la lumière émises par les opérations. Les verres transparents protégeant le verre filtrant devraient être nettoyés chaque fois que nécessaire et remplacés lorsqu'ils sont rayés ou endommagés. Si le procédé cause des projections de métal en fusion ou de particules brûlantes, les vêtements protecteurs devraient être évités. La nature et l'épaisseur des vêtements ignifuges devraient dépendre du risque encouru. Dans les opérations de découpage et de soudage à l'arc, des couvre-chaussures en cuir ou autres guêtres devraient être portés afin d'empêcher les particules en fusion de pénétrer dans les bottes et les chaussures. Le port de gants à crispin en cuir ou en toile est suffisant pour protéger les mains et les avant-bras contre la chaleur, les projections, les scories, etc. Il pourra également être nécessaire de porter d'autres vêtements protecteurs comme des tabliers, des gilets, des manches, des guêtres et des capuches ou des cagoules en cuir. En cas de soudage en l'air, une cape de protection et une capuche sont indispensables. Tous les vêtements protecteurs devraient être exempts d'huile et de graisse, les coutures étant placées à l'intérieur, de manière à ne pas piéger de particules de métal en fusion. Les vêtements ne devraient avoir ni poches ni revers susceptibles de retenir les étincelles; ils seront portés de telle manière que les manches recouvrent les gants, et les guêtres, les chaussures, etc. Les vêtements protecteurs devraient être régulièrement inspectés pour vérifier qu'il n'y a pas de coutures décousues ou de trous par lesquels pourraient passer des gouttes de métal ou des scories en fusion. Les pièces lourdes, laissées à refroidir jusqu'à prise complète de la soudure, devraient toujours être signalées par une inscription avertissant les autres travailleurs qu'il s'agit d'un objet brûlant. En soudage par résistance, la chaleur produite n'étant pas toujours visible, la manipulation de pièces encore chaudes occasionne parfois des brûlures. Si l'opération est correctement exécutée, le soudage par points, à la molette ou par bossages ne doit pas occasionner de projections de particules métalliques brûlantes ou en fusion; toutefois, des écrans ininflammables devraient être employés et des précautions contre l'incendie prises. Au demeurant, les écrans protègent également des brûlures aux yeux ceux qui passeraient à proximité. On ne devrait pas laisser de pièces métalliques non fixées dans la partie mobile de la machine, car elles risquent d'être projetées en dehors avec une certaine force.

#### **La sécurité électrique**

Bien que les tensions à vide soient relativement basses dans le soudage à l'arc manuel (80 V environ au maximum), les intensités sont élevées et les circuits primaires des transformateurs présentent les risques habituels d'un équipement fonctionnant sous la tension du réseau. Il ne faut donc pas sous-estimer les risques de choc électrique, surtout lorsque l'espace manque ou que la position de travail de l'opérateur est instable.

Avant le début du soudage, il convient de vérifier systématiquement la mise à la terre du matériel de soudage. Les câbles et les connecteurs devraient être en parfait état et d'une capacité suffisante. Pour la prise de terre, un serre-fil ou une borne à vis appropriés devraient toujours être utilisés. Si deux ou plusieurs postes de soudage sont mis à la terre par raccordement à une

même structure ou si d'autres outils électroportatifs sont également en service, une personne qualifiée devrait être chargée d'en contrôler la mise à la masse. Le poste de travail devrait être sec, sûr et exempt d'obstacles dangereux. Une grande importance doit être donnée à l'aménagement, à l'éclairage, à la ventilation et à la propreté du lieu de travail. Pour le travail en espace confiné ou dans des positions instables, il est possible d'intercaler dans le circuit de soudage des dispositifs supplémentaires de protection électrique (abaisseurs de tension à vide) de façon à garantir qu'il ne passe dans le porte-électrode qu'un courant de tension très faible quand la machine n'est pas en phase de soudage (les conditions de travail dans des espaces confinés sont traitées ci-après). Il est recommandé d'employer comme torches porte-électrode des systèmes à serrage par ressort ou par filetage. La poignée de la torche peut être revêtue d'une gaine isolante de façon à réduire l'inconfort dû à la chaleur. Pour éviter l'échauffement, les mâchoires et les connexions des torches porte-électrode devraient être nettoyées et resserrées périodiquement. Lorsqu'une torche n'est pas en service, elle devrait pouvoir être suspendue en toute sécurité à un crochet ou à un support isolés. Le raccordement des câbles devrait être conçu de manière que leur isolation n'ait pas à souffrir des mouvements continus de flexion qu'ils subissent. On doit éviter de traîner les câbles électriques ou les tuyaux flexibles en plastique d'alimentation en gaz (dans les procédés à atmosphère protectrice) sur des plaques ou des soudures encore chaudes. Le câble de soudage ne devrait entrer en contact ni avec la pièce à souder ni avec aucune autre «masse». Les tuyaux en caoutchouc et les câbles à gaine caoutchoutée doivent être tenus éloignés du point où a lieu la décharge à haute fréquence, car l'ozone dégagé décompose le caoutchouc. On utilisera des tubes en plastique et des câbles recouverts de poly(chlorure de vinyle) pour raccorder le transformateur à la torche porte-électrode, tandis que, côté primaire, des câbles sous gaine caoutchouc vulcanisée ou renforcée conviennent. L'encrassement et les poussières conductrices, métalliques ou autres, peuvent provoquer une panne du générateur haute fréquence. Pour éviter d'en arriver là, il devrait donc être régulièrement nettoyé à l'air comprimé. L'opérateur chargé du soufflage devrait porter un casque antibruit lors de l'utilisation de l'air comprimé pendant plus de quelques secondes. Dans le cas du soudage par bombardement électronique, il devrait être vérifié avant chaque opération que l'équipement présente la sécurité voulue. Un système d'interverrouillage des divers coffrets doit par ailleurs être prévu pour éviter les risques d'électrocution. Il est également nécessaire que tous les postes de soudage et coffrets de commande soient reliés à la terre de manière fiable. S'agissant du procédé à l'arc plasma, des tensions de l'ordre de 400 V sont parfois nécessaires pour découper des matériaux de forte épaisseur, ce qui n'est pas sans danger. La technique d'amorçage de l'arc par une impulsion à haute fréquence expose l'opérateur à des décharges désagréables et à de douloureuses brûlures en profondeur.

### Le rayonnement ultraviolet

La lumière aveuglante émise par l'arc électrique contient une proportion élevée de rayons ultraviolets; il suffit d'une exposition, même momentanée, aux éclairs, y compris ceux provenant de travaux exécutés à proximité, pour causer une douloureuse conjonctivite (ophtalmie des soudeurs). Toute personne ayant été exposée de cette manière doit consulter immédiatement un médecin. A la suite d'une exposition excessive aux rayons ultraviolets, on observe en outre parfois un échauffement, voire une brûlure de la peau (effet coup de soleil). Les principales précautions à prendre sont les suivantes:

- un masque ou un casque équipé d'un filtre de la teinte voulue (voir à ce sujet, au chapitre n° 31, «La protection individuelle», de l'*Encyclopédie*, l'article intitulé «La protection des yeux et du

visage»), devraient être utilisés. Pour le soudage sous gaz protecteur et le découpage à l'arc au charbon, les masques à main de forme plate ne protègent pas suffisamment du rayonnement par réflexion; le port du casque devrait par conséquent s'imposer. Des lunettes spéciales avec filtre ou des lunettes avec écrans latéraux devraient être portées sous le casque pour éviter l'exposition lorsqu'on soulève la visière pour examiner le travail. Le casque assure également une protection contre les projections et les scories en fusion. Les casques et les masques à main sont équipés, côté visage, d'un verre filtrant lui-même protégé, côté travail, par une plaque de verre incolore qui devrait être nettoyée régulièrement et remplacée dès qu'elle est rayée ou endommagée;

- le visage, la nuque ou les autres parties exposées du corps devraient être convenablement protégés, surtout si l'on travaille à côté d'autres soudeurs;
- les aides devraient porter au minimum des lunettes protectrices appropriées ainsi que d'autres équipements de protection individuelle si le risque le justifie;
- toutes les opérations de soudage à l'arc devraient être exécutées à l'abri d'écrans de façon à protéger les personnes travaillant à proximité. Quand le travail à l'arc électrique se fait à poste fixe ou dans des ateliers de soudage, on devrait installer des écrans permanents partout où cela est possible; à défaut, on optera pour des écrans provisoires. Tous ces écrans devraient être opaques, de construction robuste et réalisés en matériaux ignifugés;
- l'emploi de peintures noires pour l'intérieur des cabines de soudage est maintenant chose admise, mais seules des peintures donnant une finition mate devraient être utilisées. L'éclairage devrait être conçu de manière à ne pas causer une fatigue oculaire qui risquerait d'entraîner des maux de tête, voire des accidents;
- pour la sécurité des personnes travaillant à proximité, les cabines de soudage et les écrans mobiles devraient faire l'objet de contrôles réguliers pour vérifier leur bon état.

### Les risques chimiques

Les contaminants en suspension dans l'air émis au cours du soudage et du découpage thermique, y compris les fumées et les gaz, proviennent de plusieurs sources:

- le métal à souder, le métal de la baguette d'apport ou les constituants des diverses nuances d'acier, tels que le nickel ou le chrome;
- le revêtement métallique recouvrant éventuellement la pièce à souder ou la baguette d'apport (zinc et cadmium de placage, zinc de galvanisation ou fine couche de cuivre protégeant les baguettes en acier doux, par exemple);
- le cas échéant, les peintures, graisses, débris et autres substances présentes sur la pièce à souder (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, fumées et autres produits de décomposition irritants, par exemple);
- le flux revêtant la baguette d'apport (fluorure minéral, par exemple);
- l'action de la chaleur ou du rayonnement ultraviolet sur l'air ambiant (dioxyde d'azote, ozone, par exemple) ou sur les hydrocarbures chlorés (phosgène, par exemple);
- le gaz inerte servant d'atmosphère protectrice (dioxyde de carbone, hélium, argon, par exemple).

Les fumées et les gaz devront être éliminés à la source par un système de ventilation avec aspiration localisée. On pourra procéder soit par confinement partiel du poste de travail, soit par installation de hottes aspirantes assurant une circulation de l'air suffisamment rapide au poste de soudage pour garantir l'évacuation des fumées.

Une attention particulière devrait être portée à la ventilation dans le cas du soudage de métaux non ferreux et de certains aciers alliés, ainsi qu'à la protection contre les risques de formation d'ozone, de monoxyde de carbone et de dioxyde d'azote. Des systèmes d'aspiration transportables ou fixes existent à cette fin. D'une manière générale, l'air extrait ne doit pas être repris. Il ne peut être recyclé qu'en l'absence de niveaux dangereux d'ozone ou d'autres gaz toxiques et après filtrage au moyen d'un filtre à haute efficacité.

En soudage par bombardement électronique, quand les matériaux à souder présentent un caractère toxique (béryllium, plutonium, etc.), on doit veiller à protéger l'opérateur du nuage de poussières auquel il pourrait être exposé à l'ouverture de la cabine.

Lorsqu'il existe un risque d'exposition à des fumées toxiques (de plomb, par exemple) et que la ventilation avec aspiration localisée n'est pas envisageable — démolition par oxycoupage d'ossatures revêtues d'une peinture au plomb, par exemple —, le recours à un appareil de protection respiratoire s'impose. En pareil cas, le travailleur doit porter soit un masque complet à filtre haute efficacité de type agréé, soit un appareil respiratoire à épurateur à pression positive. Le moteur, tout comme la batterie, doivent être soigneusement entretenus, en particulier dans le cas du masque à haut rendement à pression positive fonctionnant en circuit ouvert. L'emploi d'appareils de protection respiratoire à air comprimé en circuit fermé devrait être encouragé si une alimentation en air comprimé respirable est disponible. Si le port d'un équipement de protection respiratoire ne peut être évité, il faudra se demander si la sécurité des lieux de travail n'exige pas de précautions supplémentaires, compte tenu des risques pouvant par ailleurs exister: champ de vision restreint, tuyaux traînant au sol, etc.

### La fièvre des fondeurs

La fièvre des fondeurs est une maladie fréquemment signalée chez les travailleurs exposés aux vapeurs d'oxyde de zinc dégagées par la galvanisation ou l'étamage, chez les fondeurs de laiton, lors du soudage des métaux galvanisés et des opérations de métallisation, ainsi qu'à la suite d'une exposition à d'autres métaux tels que le cuivre, le manganèse et le fer. On l'observe chez les travailleurs nouvellement embauchés et chez ceux qui reprennent le travail après une fin de semaine ou une période de congé. Il s'agit d'une affection aiguë qui se produit plusieurs heures après l'inhalation de particules d'un métal ou de ses oxydes. Sa première manifestation est une sensation de goût désagréable dans la bouche, suivie de sécheresse et d'irritation des muqueuses respiratoires, accompagnées de toux et, parfois, de dyspnée et de sensation d'oppression thoracique. On observe éventuellement aussi des nausées et des maux de tête et, une dizaine d'heures après l'exposition, des frissons et une fièvre parfois très forte. Ces symptômes, qui durent plusieurs heures, sont suivis de sueurs profuses et d'assoupissement, mais souvent aussi de polyurie et de diarrhée. Il n'existe pas de traitement spécifique, mais la guérison est généralement complète au bout de vingt-quatre heures, sans séquelles. La prévention consiste à maintenir l'exposition aux fumées métalliques en cause largement au-dessous des seuils recommandés au moyen d'un système efficace de ventilation avec aspiration localisée.

### Les espaces confinés

La pénétration dans un espace confiné implique certains dangers: l'atmosphère risque d'être explosive, toxique, pauvre en oxygène ou de combiner un ou plusieurs de ces risques. Tout espace confiné doit donc être certifié par une personne responsable comme étant sans danger pour celui qui y pénètre afin d'y exécuter un travail à l'arc ou à la flamme. Un programme fixant des règles pour l'accès à de tels espaces, éventuellement assorti d'un système d'autorisations, peut être nécessaire, voire impératif s'il s'agit de travaux à

Figure 82.3 • Soudage dans un espace confiné



S.F. Gilmon

exécuter à l'intérieur d'espaces manifestement non destinés à être occupés en permanence. C'est notamment le cas des trous de visite, des caves, des cales de navire, etc. La ventilation des espaces confinés est cruciale, étant donné que le soudage au gaz dégage non seulement des contaminants, mais épuise aussi l'oxygène. Les procédés de soudage à l'arc en atmosphère gazeuse peuvent aussi appauvrir la teneur de l'air en oxygène (voir figure 82.3.)

### Le bruit

Le bruit représente un danger dans plusieurs procédés de soudage: soudage à l'arc plasma, soudage par résistance et soudage au gaz notamment. En soudage à l'arc plasma, la projection du plasma à très haute vitesse s'accompagne d'un bruit intense (jusqu'à 90 dBA), notamment dans les gammes de fréquence élevées. L'emploi de l'air comprimé pour éliminer les poussières par soufflage génère aussi des niveaux sonores importants. Afin de prévenir des atteintes auditives, il est indispensable de prescrire le port de bouchons auriculaires ou d'un casque antibruit et d'instituer un programme de préservation de l'ouïe comportant des examens audiométriques (capacité auditive), le tout s'appuyant sur une formation des travailleurs.

### Les rayonnements ionisants

Dans les ateliers où le contrôle des soudures est effectué par radiographie ou gammagraphie, les avertissements et les instructions d'usage doivent être rigoureusement observés. Les travailleurs doivent être tenus à distance des appareils de contrôle. Les sources radioactives ne doivent être manipulées qu'avec des outils spéciaux et avec les précautions requises. La réglementation en vigueur, tant locale que nationale, doit être respectée. Voir à ce sujet le chapitre n° 48, «Les rayonnements ionisants», de l'*Encyclopédie*.

S'agissant du soudage par bombardement électronique, les parois et les hublots de la chambre à vide doivent être protégés contre les rayons X au moyen d'un blindage approprié. Tous les éléments de la machine assurant la protection contre les rayons X devraient être équipés de sécurité interdisant une mise en marche de la machine s'ils ne sont pas en place. Au moment de leur

installation, les machines devraient être contrôlées en vue de détecter d'éventuelles fuites de rayons X et faire ensuite l'objet de contrôles périodiques.

#### Autres dangers

Les machines à souder par résistance ont au moins une électrode qui se déplace avec une force considérable. Le doigt ou la main de l'opérateur risquent donc d'être écrasés s'ils se trouvent pris dans les électrodes quand la machine fonctionne. En conséquence, il doit être mis au point un système de protection approprié pour éviter ce risque. Quant aux risques de blessures par coupure et lacération, il est possible de les réduire par l'ébarbage des arêtes des pièces et par le port de gants, de préférence à crispins.

Des procédures de consignation/déconsignation devraient être appliquées lors des opérations d'entretien ou de réparation des machines fonctionnant à l'énergie électrique, mécanique ou autre.

Pendant le piquage du laitier adhérent aux cordons de soudage, les yeux des travailleurs doivent être protégés par des lunettes spéciales ou tout autre moyen approprié.

## ● LES TOURS

*Toni Retsch\**

On se fera une idée de la place importante que tiennent les tours dans les ateliers de mécanique lorsqu'on saura que 90 à 95% des copeaux produits dans la robinetterie proviennent de tours. Un dixième environ de ceux qui sont déclarés dans ce secteur, soit un tiers de l'ensemble de ceux qui sont dus aux machines, sont imputables aux tours. Selon une étude sur la fréquence relative des accidents par machine effectuée dans une usine fabriquant du petit matériel de précision et de l'appareillage électrique, les tours viennent au cinquième rang après les machines à bois, les scies à métaux, les presses mécaniques et les perceuses. La nécessité de protéger le travail au tour s'impose par conséquent à l'évidence.

Le tournage d'une pièce consiste à en diminuer le diamètre au moyen d'un outil présentant un tranchant spécial. Le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce à usiner, le mouvement d'avance et le déplacement transversal étant exécutés par l'outil coupant. En faisant varier ces trois mouvements fondamentaux, ainsi qu'en choisissant la géométrie et le matériau appropriés pour le tranchant de l'outil, on peut influencer sur la vitesse d'usinage, la qualité de l'état de surface obtenu, la forme des copeaux enlevés et l'usure de l'outil.

#### Description générale

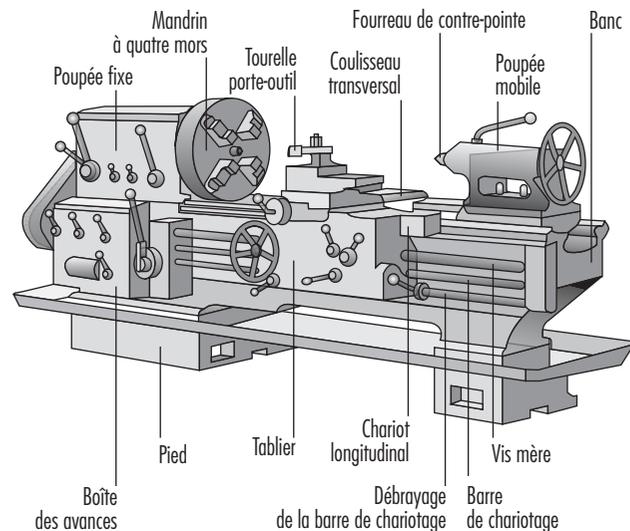
Un tour classique se compose des éléments suivants:

- un banc comportant des glissières destinées à guider le chariot et la poupée mobile;
- une poupée fixe montée sur le banc, avec broche et mandrin;
- une boîte des avances fixée à l'avant du banc qui, par l'intermédiaire de la vis mère ou de la barre de chariotage et du tablier, transmet au chariot le mouvement d'avance en fonction de la vitesse de coupe;
- un chariot portant le coulisseau transversal qui exécute les mouvements transversaux;
- un porte-outil monté sur le coulisseau transversal (voir figure 82.4).

Ce modèle classique peut être décliné en de multiples variantes, depuis la machine universelle jusqu'au tour automatique spécialement conçu pour exécuter un seul type de pièce.

\* D'après la 3<sup>e</sup> édition de l'*Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*.

Figure 82.4 • Tour, y compris à tronçonner ou à fileter



Les principaux types de tours sont les suivants:

- le *tour parallèle*. Il s'agit du type le plus courant. Il correspond au modèle de base, à broche horizontale. La pièce peut être montée entre pointes, en plateau ou dans un mandrin;
- le *tour à outils multiples*. Il permet à plusieurs outils de travailler simultanément;
- le *tour à tourelle revolver, tour revolver à chariot*. Avec les machines de ce type, on peut faire usiner une pièce par plusieurs outils qui interviennent successivement. Les outils sont fixés sur la tourelle qui, en pivotant, les amène en position de travail. Les tourelles peuvent être cylindriques, polygonales ou quadrangulaires;
- le *tour à copier*. Le palpement d'un gabarit commande la reproduction de la forme souhaitée sur la pièce;
- le *tour automatique*. Les diverses opérations, y compris le changement de la pièce, sont automatisées. Il existe des tours automatiques travaillant dans la barre et d'autres équipés pour le travail en mandrin;
- le *tour vertical (aléseuse)*. La pièce tourne autour d'un axe vertical; un dispositif de serrage la rend solidaire d'une table tournante horizontale. Ce type de machine sert généralement à usiner des pièces de fonderie ou des pièces forgées de grande dimension;
- les *tours à commande numérique et à commande numérique assistée par ordinateur*. Toutes les machines citées plus haut peuvent être équipées d'une commande numérique ou d'une commande numérique assistée par ordinateur. On obtient ainsi un tour automatique ou semi-automatique susceptible d'une utilisation à peu près universelle grâce à la grande adaptabilité et à la facilité de programmation du système de commande.

Il est vraisemblable que les futurs perfectionnements des tours porteront surtout sur les systèmes de commande. Les commandes par contacteurs seront de plus en plus remplacées par des systèmes à commande électronique. En ce qui concerne ces derniers, l'évolution tend à remplacer les commandes programmées par interpolation par des commandes programmées en mémoire. Il est à prévoir qu'à terme le recours à des ordinateurs industriels de plus en plus puissants contribuera à optimiser les procédés d'usinage.

## Les accidents

Le plus souvent, avec les tours, les accidents proviennent des causes suivantes:

- le non-respect des règles de sécurité lors de l'installation des machines dans les ateliers (espace insuffisant entre les machines, absence de commutateur de mise hors circuit pour chacune des machines, par exemple);
- l'absence de protecteurs ou le manque de dispositifs auxiliaires (des travailleurs ont été victimes de graves accidents alors qu'ils tentaient de freiner la broche de leur tour en faisant pression d'une main sur des poulies sans capot ou en actionnant par inadvertance des leviers ou des pédales d'embrayage non protégés; on constate également des blessures causées par la projection de copeaux, faute de capots articulés ou coulissants);
- les organes de commande mal placés (la pointe de la poupée mobile risque de perforer la main du tourneur si la pédale commandant le mandrin est confondue avec celle qui commande le circuit hydraulique d'avance de la contre-pointe, par exemple);
- les conditions de travail défavorables (lacunes en matière de physiologie du travail, par exemple);
- l'absence d'équipement de protection individuelle ou le port de vêtements de travail inadaptés (des blessures graves, voire mortelles, ont été enregistrées chez des tourneurs qui portaient des vêtements trop amples ou qui avaient des cheveux longs non attachés);
- l'insuffisance de formation du personnel (on a connu le cas d'un apprenti mortellement blessé alors qu'il limait un arbre court, fixé entre pointes, dont la rotation était assurée par un toc à queue coudée sur le nez de broche et un toc à queue droite sur l'arbre; sa manche gauche s'étant prise dans le toc de tour, elle s'est enroulée autour de la pièce et l'apprenti a été violemment happé par la machine);
- la mauvaise organisation du travail conduisant à l'emploi d'un matériel inadapté (ainsi, une longue barre était en cours d'usinage sur un tour de production conventionnel; trop longue pour le tour, la barre dépassait d'un mètre hors de la poupée fixe; de plus, l'ouverture du mandrin s'étant trouvée trop grande pour la barre, on avait compensé l'écart en insérant des coins de bois; lorsque la broche a commencé à tourner, l'extrémité de la barre qui se trouvait en porte-à-faux s'est coudée, par fouettement, à 45 degrés et est venue frapper la tête du tourneur qui décéda dans la nuit);
- les pièces de machine défectueuses (si la commande d'embrayage n'est pas parfaitement ajustée, la broche peut commencer à tourner alors que le travailleur est en train de régler une pièce dans le mandrin, par exemple).

## La prévention des accidents

La prévention des accidents de tour commence dès le stade de la conception. Les concepteurs devront s'intéresser de très près aux éléments de commande et de transmission.

### Les éléments de commande

Chaque tour doit impérativement être doté d'un commutateur coupe-circuit ou sectionneur afin que l'on puisse procéder en toute sécurité aux travaux d'entretien et de réparation. Cet interrupteur doit couper le courant sur tous les pôles, interrompre effectivement les alimentations pneumatique et hydraulique, et mettre les circuits à l'atmosphère. Sur les grosses machines, l'interrupteur devrait être conçu de manière à pouvoir être verrouillé par cadenas en position ouverte afin d'empêcher toute remise sous tension intempestive.

Les commandes devraient être disposées de telle sorte que l'opérateur puisse les distinguer et les atteindre facilement, sans

que la manœuvre présente le moindre risque. Elles ne doivent donc jamais être placées en des points où l'on ne puisse les atteindre qu'en passant la main par-dessus la zone de travail du tour, ni en des endroits où elles risquent d'être actionnées par des projections de copeaux.

Les commutateurs qui contrôlent les éléments de protection et les asservissent à l'entraînement de la machine devraient être choisis et installés de manière à couper le circuit dès que l'élément protecteur a quitté sa position protectrice.

Les dispositifs d'arrêt d'urgence doivent déclencher l'immobilisation immédiate de l'organe dangereux. Ils doivent être conçus et disposés de manière à pouvoir être facilement actionnés par le travailleur menacé. Les boutons d'arrêt d'urgence devraient être facilement accessibles et de couleur rouge.

Les éléments de manœuvre susceptibles de déclencher un mouvement dangereux de la machine seront protégés de manière à interdire tout actionnement intempestif. C'est ainsi, par exemple, que les leviers d'embrayage de la poupée fixe et du tablier devraient être munis de dispositifs de verrouillage ou d'écrans de sécurité. Il est facile de sécuriser un bouton-poussoir en l'encastant ou en le protégeant par une collerette.

Les commandes manœuvrées à la main devraient être conçues et disposées de telle manière que le mouvement de la main corresponde au mouvement de la machine commandée.

Les commandes devraient être repérables au moyen d'inscriptions faciles à lire et à comprendre. Pour éviter les malentendus et les difficultés linguistiques, il est préférable d'employer des symboles.

### Les éléments de transmission

Tous les éléments de transmission mobiles (courroies, poulies, engrenages) doivent être protégés par des capots. Les personnes responsables de l'installation des machines sont en mesure de contribuer pour une part importante à la prévention des accidents causés par les tours. Ceux-ci devraient être installés de telle manière que leurs opérateurs ne risquent pas de se gêner ni de se mettre en danger les uns les autres. Les opérateurs ne devraient pas tourner le dos aux passages. Des écrans protecteurs devraient être mis en place si des projections de copeaux risquent d'atteindre d'autres postes de travail ou des passages situés à proximité du tour.

Les passages doivent être délimités par un marquage bien visible. Un espace suffisant doit être réservé à l'équipement de maintenance des matières à usiner, à l'empilement des pièces et aux caisses à outils. Les guide-barres ne doivent en aucun cas faire saillie dans les passages.

Le sol sur lequel se tient l'opérateur doit être isolé du froid. Il conviendrait de s'assurer que la couche isolante ne forme pas une saillie sur laquelle on risque de trébucher et que le sol n'est pas glissant, même lorsqu'il est recouvert d'une pellicule d'huile.

Les gaines et les canalisations devraient être installées de manière à ne pas former d'obstacles. Les installations provisoires devraient être proscrites.

A l'atelier, les moyens de prévention technique devraient privilégier les points suivants:

- les dispositifs de serrage (plateaux porte-pièce, mandrins, pinces de serrage) devraient faire l'objet d'un équilibrage dynamique avant l'emploi;
- la vitesse maximale autorisée du mandrin devrait être indiquée sur ce dernier par le fabricant et respectée par le conducteur de la machine;
- en cas d'emploi de mandrins à serrage concentrique, on devrait s'assurer que les mors ne risquent pas d'être éjectés au démarrage du tour;
- les mandrins de ce type devraient être conçus de telle manière que la clé de serrage ne puisse pas être enlevée tant que les

mors n'auront pas été serrés. D'une manière générale, les clés de serrage devraient être conçues de façon qu'on ne puisse pas les laisser dans le mandrin.

Il importe de prévoir un équipement de levage auxiliaire qui facilitera le montage ou la dépose des mandrins et des plateaux les plus lourds. Pour empêcher des mandrins de se désolidariser de la broche en cas de brusque freinage du tour, ceux-ci doivent être solidement fixés. Pour ce faire, on peut placer un écrou de serrage à pas à gauche sur le nez de broche, utiliser un accouplement rapide «Camlock», munir le mandrin d'une clavette de verrouillage ou l'assujettir au moyen d'un anneau de blocage en deux parties.

En cas d'utilisation de dispositifs de serrage motorisés, tels que mandrins, douilles et pointe de poupée mobile à serrage hydraulique, des mesures doivent être prises qui rendent impossible l'introduction des mains dans la zone dangereuse du dispositif de serrage. Pour ce faire, on peut limiter la course du dispositif de serrage à 6 mm, choisir l'emplacement des systèmes de blocage automatique de manière à empêcher l'introduction des mains dans la zone dangereuse, ou faire en sorte que le mouvement de serrage ne puisse commencer qu'après la fermeture d'un capot mobile.

Si la mise en route du tour quand les mors du mandrin sont ouverts présente un danger, la machine devrait être équipée d'un dispositif empêchant l'entrée en rotation de la broche avant que les mors ne soient fermés. L'arrêt du courant ne doit déclencher ni l'ouverture ni la fermeture d'un dispositif de serrage motorisé.

Si la force de serrage d'un mandrin fonctionnant sur un réseau énergétique diminue, la rotation de la broche doit être arrêtée et il doit être impossible de la remettre en marche. L'inversion du sens de serrage de l'intérieur vers l'extérieur (ou vice versa) alors que la broche tourne ne doit en aucun cas désolidariser le mandrin de la broche. On ne devrait pouvoir retirer les dispositifs de serrage de la broche qu'après arrêt complet de sa rotation.

En cas d'usinage dans la barre, la partie en porte-à-faux dépassant du tour doit être entourée de guides. Les poids d'avance de barres doivent absolument être protégés par des capots à charnières se prolongeant jusqu'au sol.

### **Les tocs**

Pour éviter des accidents graves — en particulier à l'occasion du limage d'une pièce directement sur le tour —, on doit s'abstenir d'employer des tocs non protégés. Il conviendrait d'utiliser soit un toc de sécurité, soit un plateau pousse-toc de sécurité. Il est également possible d'employer des tocs autobloquants et de munir le disque de toc d'un capot.

### **La zone de travail du tour**

Les mandrins de tour universel devraient être protégés par des capots à charnières. Dans la mesure du possible, ils devraient être asservis aux circuits de commande de la broche. Les tours verticaux devraient être protégés par des barreaux ou des plaques pour éviter les blessures provoquées par les parties tournantes. Pour que le travailleur puisse suivre en toute sécurité l'opération d'usinage, il convient de prévoir des plates-formes munies de garde-corps. Dans certains cas, des caméras de télévision peuvent être montées pour permettre au travailleur de surveiller l'arête et l'avance de l'outil.

Les zones de travail des tours automatiques, à commande numérique et à commande numérique assistée par ordinateur devraient être intégralement capotées. Les capots des machines entièrement automatiques ne devraient comporter que les ouvertures nécessaires à l'introduction de la pièce à usiner, à l'éjection de la pièce tournée et à l'enlèvement des copeaux. Ces ouvertures ne doivent en aucun cas présenter un danger lors du passage des pièces à usiner; il doit être impossible d'y introduire la main de manière à atteindre la zone dangereuse.

Les zones de travail des tours semi-automatiques, à commande numérique et à commande numérique assistée par ordinateur doivent être capotées pendant l'usinage. Le capot comporte généralement des portes coulissantes avec interrupteurs terminaux et circuit de verrouillage réciproque.

Aucune opération exigeant l'accès à la zone de travail — changement de pièces ou d'outils, mesurage, etc. — ne doit être entreprise avant l'arrêt et la mise en sécurité du tour. La simple remise au point neutre d'un variateur de vitesse ne peut être considérée comme une immobilisation excluant tout danger. Les machines ainsi équipées doivent être munies de capots de protection verrouillés, impossibles à déverrouiller tant que la machine n'est pas arrêtée de manière absolument sûre (coupure de l'alimentation du moteur de broche, par exemple).

Si la machine nécessite des opérations particulières de réglage, elle doit être dotée d'un mécanisme au coup par coup permettant de commander certains mouvements au ralenti malgré l'ouverture du capot. En pareil cas, la protection du travailleur pourra être assurée par des configurations de circuit spéciales (n'autorisant, par exemple, que le contrôle d'un seul mouvement à la fois) ou par des commandes à deux mains.

### **Les tournures**

Les longs copeaux de tournage sont dangereux, car ils peuvent s'emmêler autour des bras et des jambes et provoquer de graves blessures. On peut éviter la formation de copeaux continus et emmêlés en choisissant des vitesses de coupe, des avances et des épaisseurs de copeaux appropriées, ou encore en utilisant des outils munis de brise-copeaux à goujure enrouleuse ou à gradin. Pour enlever les copeaux à la main, on se servira de crochets à manche et à boucle.

### **L'ergonomie**

Chaque machine devrait être conçue de manière à autoriser un rendement maximal pour un minimum de fatigue du travailleur. Cela peut se faire en adaptant la machine au travailleur.

La conception de l'interface opérateur-machine du tour doit tenir compte des facteurs ergonomiques. Une organisation rationnelle du poste de travail suppose également que l'on mette à la disposition du travailleur du matériel de manutention auxiliaire, notamment des moyens de chargement et de déchargement.

On doit placer toutes les commandes à l'intérieur de la sphère physiologique ou à portée des deux mains. La configuration des commandes doit apparaître clairement, et leur fonctionnement être logique. On devrait éviter d'installer des commandes à pédale sur des machines conduites par des personnes travaillant debout.

L'expérience a montré que le travail est de bonne qualité lorsque le poste de travail permet de travailler aussi bien debout qu'assis. Si la personne doit travailler debout, on devrait lui donner la possibilité de changer de position. Des sièges rabattables, permettant de reposer les pieds et les jambes fatigués, sont généralement appréciés.

Tout devrait être fait pour optimiser le confort thermique, en tenant compte de la température de l'air, de l'humidité relative, de la ventilation et de la chaleur rayonnante. L'atelier devrait être convenablement ventilé. Des dispositifs d'aspiration devraient permettre d'éliminer à la source les émanations de gaz. En cas d'usinage dans la barre, on devrait employer des tubes de guidage garnis d'un revêtement à absorption phonique.

L'atelier devrait de préférence disposer d'un éclairage uniforme, apportant un niveau d'éclairage suffisant.

### **Les vêtements de travail et la protection individuelle**

Les combinaisons de travail devraient être taillées près du corps et boutonnées ou fermées jusqu'au cou au moyen d'une fermeture à glissière. Elles ne devraient pas comporter de poches de poitrine