

et leurs manches doivent être fermées étroitement par des boutons autour des poignets. Les travailleurs ne devraient porter ni ceinture, ni bagues, ni anneaux, ni bracelets pendant le travail au tour. Le port de lunettes de sécurité devrait être obligatoire. En cas d'usinage de pièces lourdes, le travailleur doit porter des chaussures de sécurité à embout d'acier. Des gants de protection doivent être portés pour ramasser les copeaux.

### La formation

La sécurité du tourneur dépend dans une grande mesure des méthodes de travail. Il devrait donc recevoir une formation théorique et pratique approfondie qui lui permette non seulement d'acquiescer les qualifications requises, mais aussi d'adopter les comportements offrant la meilleure prévention possible contre les accidents. Qu'il s'agisse de la posture, des mouvements, du choix et de la manipulation des outils, les règles de bonne pratique devraient être devenues une routine telle que le travailleur continue de les appliquer même lorsque son attention se relâche momentanément.

Le programme de formation insistera notamment sur la posture correcte en position debout, les règles de mandrinage et de démandrinage, ainsi que la précision et la rigueur lors de la fixation des pièces. La sûreté du geste lors du maniement des limes et des grattoirs ou de l'emploi de la toile abrasive doit faire l'objet d'un entraînement intensif.

Les travailleurs doivent être parfaitement informés des risques auxquels ils s'exposent lors du mesurage des pièces, de la vérification des réglages et du nettoyage des tours.

### L'entretien

Les tours doivent être régulièrement entretenus et lubrifiés. Il doit être immédiatement remédié aux défauts. Si la défektivité compromet la sécurité, la machine devrait rester hors service tant qu'elle n'aura pas été réparée.

L'alimentation électrique de la machine doit être coupée avant tous travaux de réparation et d'entretien.

## ● LE MEULAGE ET LE POLISSAGE

*K. Welinder\**

Au sens le plus général, le meulage désigne une technique d'usinage utilisant des grains d'abrasif liés entre eux par un agglomérant et destinée à enlever de très fines particules de matière sur la pièce à usiner. L'opération a pour but de conférer à la pièce une certaine forme, d'en rectifier les dimensions, d'améliorer son état de surface ou, pour les arêtes de coupe, d'en augmenter le tranchant. Il s'agit, par exemple, d'enlever les appendices de coulée et d'ébarber les arêtes des pièces brutes de fonderie, de décalaminer les surfaces métalliques avant forgeage ou soudage et d'ébavurer les pièces dans les ateliers de tôlerie et de mécanique. Quant au polissage, il a pour but de supprimer les imperfections superficielles telles que les traces d'outil. Enfin, le brunissage n'enlève pas de métal, mais fait appel à un abrasif doux, mélangé à une base cireuse ou graisseuse, pour donner une surface brillante.

De toutes les techniques d'usinage, le meulage est la plus riche en possibilités et la plus diversifiée. Il est employé pour un grand nombre de matériaux: fer et acier surtout, mais aussi d'autres métaux, bois, plastiques, pierre, verre, céramique, etc. Le terme recouvre encore d'autres techniques d'abrasion visant à obtenir

des surfaces très lisses ou brillantes telles que le polissage, l'affilage, l'affûtage, le pierrage ou le rodage.

Les outils abrasifs utilisés sont des meules de diverses dimensions, des segments, des pointes, des pierres à aiguiser, des limes, des disques ou des bandes de polissage, etc. Dans le cas des meules et autres outils du même genre, les grains d'abrasif sont maintenus ensemble par des agents agglomérants pour former une masse rigide, généralement poreuse. Sur les bandes abrasives, l'agglomérant assure l'adhérence des grains à un support flexible. Les meules flexibles sont constituées de disques en coton ou autres textiles cousus ensemble.

Les abrasifs naturels — corindon naturel ou émeri (oxyde d'aluminium), diamant, grès, silex et grenat — ont été en grande partie supplantés par des abrasifs artificiels tels que l'oxyde d'aluminium (alumine fondue), le carbure de silicium (carborundum) et les diamants synthétiques. On emploie également, notamment pour le polissage, un certain nombre de matériaux à grains fins tels que la craie, la ponce, la poudre de tripoli, la potée d'étain et l'oxyde de fer.

L'abrasif le plus utilisé pour la fabrication des meules est l'oxyde d'aluminium, suivi par le carbure de silicium. Le diamant, naturel et artificiel, est réservé à des applications spéciales. L'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium, l'émeri, le grenat et le silex servent à la fabrication de bandes abrasives et à polir.

Les agglomérants utilisés pour les meules sont aussi bien organiques que minéraux. Parmi ceux du second type, les plus importants sont le silicate et la magnésite vitrifiées. Les principaux agglomérants organiques sont la résine phénol ou urée-formaldéhyde, le caoutchouc et la gomme laque (shellac). Ce sont les agglomérants vitrifiés et la résine phénolique qui viennent de loin au premier rang dans leurs catégories respectives. Les meules diamantées peuvent aussi être fabriquées avec un agglomérant métallique. Les propriétés abrasives des meules, de même que certaines de leurs caractéristiques liées à la sécurité, dépendent des agglomérants utilisés.

Les bandes et les disques abrasifs ou à polir se composent d'un support flexible en papier ou en toile sur lequel les grains abrasifs sont fixés à l'aide d'un adhésif naturel ou synthétique.

On emploie des machines différentes pour exécuter les divers types d'opérations: surfaçage; rectification de pièces de révolution (y compris par la technique dite sans centres ou pointes); rectification intérieure; ébarbage et tronçonnage. Il existe deux types principaux de machines: celles à déplacement manuel de l'outil ou de la pièce et celles à avances et organes de serrage mécaniques. C'est ainsi que l'on trouve notamment des machines à rectifier les surfaces planes; des meuleuses; des machines et des bancs à polir sur pied; des calibreuses et des machines à polir à disque abrasif; des machines à rectifier les alésages; des scies à meule; des polisseuses à bande; des meuleuses et des polisseuses portatives ainsi que des polisseuses à disques multiples.

### Les risques et leur prévention

#### L'éclatement

Le principal risque d'accident lié à l'emploi des meules est celui d'un éclatement en plein travail. Les vitesses de rotation sont généralement élevées et il existe une tendance à les augmenter toujours davantage. La plupart des pays industriels ont instauré des réglementations qui limitent les vitesses maximales autorisées pour les différents types de meules.

La précaution essentielle consiste à fabriquer des meules aussi solides que possible. La nature de l'agglomérant revêt à cet égard une extrême importance. Comparés aux agglomérants minéraux, les liants organiques, en particulier les résines phénoliques, donnent des meules plus solides, résistant mieux aux chocs et autorisant des vitesses périphériques supérieures.

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

Les meules à grande vitesse de rotation, en particulier, comportent souvent divers systèmes de renforcement. C'est ainsi que certaines meules-boisseaux sont équipées de moyeux flasques en acier afin d'accroître leur résistance à l'éclatement. Pendant la rotation, l'effort maximal s'exerce autour de l'alésage. Pour renforcer la meule, la partie voisine de l'alésage, qui n'intervient pas dans le travail d'abrasion, peut donc être constituée d'un matériau impropre au meulage, mais d'une résistance élevée. De grandes meules, ainsi renforcées dans leur partie centrale, sont employées en particulier dans les aciéries pour meuler les barres, billettes et autres produits sidérurgiques à des vitesses atteignant 80 m/s.

La méthode la plus courante pour renforcer les meules consiste cependant à y incorporer des fibres de verre. Les meules minces destinées par exemple au tronçonnage peuvent en contenir dans leur partie médiane ou sur chacun de leurs flancs, tandis que les meules plus épaisses en contiennent plusieurs couches dont le nombre dépend de l'épaisseur de la meule.

A l'exception de certaines meules de petite dimension, le fabricant doit soumettre à des essais de vitesse la totalité ou un échantillon statistique des meules qu'il produit. L'essai le plus couramment pratiqué est l'épreuve dite de «survitesse». La réglementation des essais varie selon les pays, mais généralement, la vitesse d'essai représente une fois et demie la vitesse de service. Quand des meules sont destinées à fonctionner à des vitesses supérieures à la normale, certains pays exigent que des tests spéciaux soient pratiqués dans un institut central d'essais qui peut en outre prélever des échantillons sur la meule pour en étudier les propriétés physiques. Les meules à tronçonner sont soumises à des essais de choc, de flexion, etc. Le fabricant est également tenu d'assurer le bon équilibrage de la meule avant livraison.

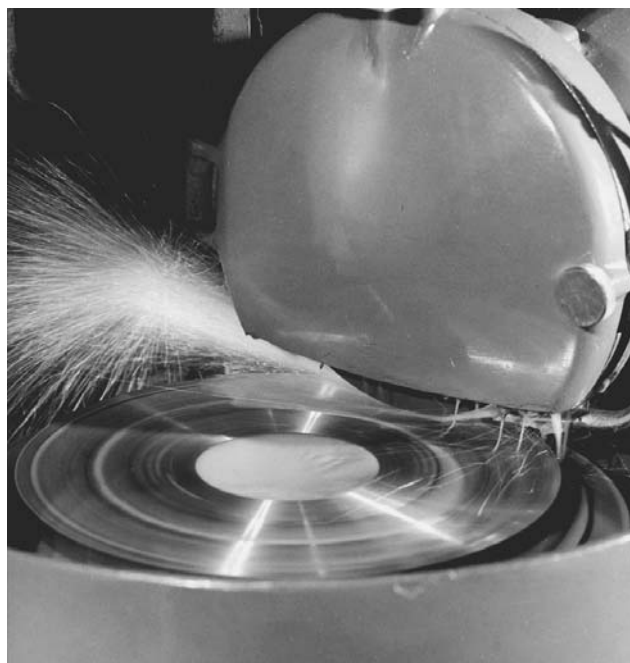
L'éclatement d'une meule risque de blesser gravement ou même mortellement toute personne se tenant à faible distance et d'occasionner des dommages sérieux au matériel et aux bâtiments. Malgré toutes les précautions prises par les fabricants, il peut encore arriver qu'une meule éclate ou se brise si elle n'est pas employée avec tout le soin nécessaire. Un certain nombre de mesures de prudence s'imposent en ce qui concerne:

- la *manipulation* et l'*entreposage*. Une meule risque d'être endommagée ou fêlée en cours de transport ou de manutention. Dans les meules agglomérées à la résine phénolique, l'humidité peut attaquer le liant et finir par diminuer la résistance de la meule. Les meules vitrifiées sont parfois sensibles aux variations répétées de température. Une absorption irrégulière d'eau risque de causer une perte de l'équilibrage. Il est donc essentiel de manipuler les meules avec précaution en toute circonstance et de les ranger soigneusement au sec, à l'abri des chocs;
- la *recherche des fêlures*. Pour vérifier qu'une meule neuve est intacte et exempte d'humidité, il suffit de la frapper à petits coups de maillet. Une meule vitrifiée en parfait état rend un son clair, une meule à agglomérant organique un son plus sourd; mais l'un comme l'autre se distinguent aisément du son fêlé d'une meule défectueuse. En cas de doute, on devrait renoncer à utiliser la meule et consulter le fournisseur;
- l'*essai*. Avant leur mise en service, les meules neuves devraient être testées à pleine vitesse, avec les précautions nécessaires. Après un meulage sous arrosage, la meule devrait être maintenue en rotation à vide afin d'éliminer le liquide qui risquerait de s'accumuler à la partie inférieure et de la déséquilibrer en provoquant éventuellement son éclatement lors d'une prochaine utilisation;
- le *montage*. Des accidents et des casses se produisent quand les meules sont montées sur des appareils impropres à cet usage, aux extrémités d'un touret de polissage par exemple. Le diamètre de l'arbre porte-meule devrait être suffisant, mais pas trop grand, de manière à ne pas risquer de forcer l'alésage de la

meule; les flasques devraient avoir un diamètre au moins égal au tiers de celui de la meule et être en acier doux ou en matériau similaire;

- la *vitesse*. En aucun cas, la vitesse maximale de rotation admissible, spécifiée par le fabricant, ne devrait être dépassée. Toutes les machines d'usinage par abrasion devraient comporter une plaque signalétique indiquant la vitesse de rotation de l'arbre porte-meule; chaque meule devrait porter un marquage indiquant sa vitesse périphérique maximale autorisée ainsi que le nombre de tours/minute correspondant pour la meule neuve. Des précautions spéciales doivent être prises concernant les machines à vitesse de rotation variable et pour éviter le montage, sur des machines portatives, de meules qui n'auraient pas des vitesses autorisées convenables;
- la *table porte-pièce*. Dans toute la mesure possible, on devrait employer des tables porte-pièce de dimensions suffisantes, fixées par liaison rigide. Elles devraient être réglables de manière à pouvoir être approchées le plus près possible de la meule afin d'éviter tout espace vide dans lequel la pièce risquerait de s'engager et d'entraîner le blocage, voire la casse de la meule ou, plus probablement, de happer et de blesser la main de l'opérateur;
- la *protection sous carter*. Les meules devraient être protégées par des carters assez résistants pour éviter la projection des fragments en cas d'éclatement (voir figure 82.5). Certains pays réglementent de façon détaillée le type et la forme des carters de protection et les matériaux à employer pour leur construction. On évite en général la fonte et la fonte d'aluminium. L'ouverture libre devrait être aussi petite que possible et un protecteur réglable peut être nécessaire. Exceptionnellement, lorsque la nature de la pièce interdit l'usage d'un pareil système de protection, il est possible d'utiliser des flasques protecteurs spéciaux ou des mandrins à haute sécurité. Les arbres porte-meule et les

Figure 82.5 • Meule vitrifiée de rectifieuse plane, travaillant sous carter de protection et tournant à une vitesse périphérique de 33 m/s



embouts coniques des machines à polir doubles peuvent être responsables d'accidents par happement s'ils ne sont pas efficacement protégés.

#### **Les lésions oculaires**

Dans toutes les opérations de meulage à sec, les poussières, les projections d'abrasif, de grains ou de copeaux constituent pour les yeux un risque très courant. Il est donc indispensable de protéger efficacement les yeux de l'opérateur par le port de lunettes et la pose d'écrans protecteurs sur la machine. Les écrans fixes sont particulièrement utiles quand les meules fonctionnent par intermittence, dans le cas de l'affûtage d'outils, par exemple.

#### **Les incendies**

Le meulage de pièces en alliages de magnésium présente un important risque d'incendie si des précautions très strictes ne sont pas prises contre toute inflammation accidentelle de la poussière, qui doit être enlevée et arrosée. L'ensemble des conduites d'aspiration seront maintenues en parfait état de propreté, de manière à éviter tout danger d'incendie et à assurer une ventilation efficace. Les poussières d'origine textile provenant des opérations de brunissage présentent un risque d'incendie et imposent des précautions très strictes ainsi qu'une ventilation avec aspiration localisée.

#### **Les vibrations**

Les meuleuses portatives ainsi que les tourets à meuler comportent le risque de syndrome causé par les vibrations transmises au système mains-bras, également appelé «doigt mort», du nom de son signe le plus remarquable. Pour y parer, on recommande de limiter l'intensité et la durée du travail, de revoir la conception des outils, de prévoir un équipement de protection et de surveiller l'exposition au risque et la santé des travailleurs.

#### **Les risques pour la santé**

Bien que les meules modernes ne soient plus par elles-mêmes à l'origine d'un risque silicotique grave comme l'étaient autrefois les meules de grès, des poussières siliceuses très nocives peuvent encore se détacher des matériaux meulés, pièces moulées au sable, par exemple. Certaines meules agglomérées à la résine peuvent aussi contenir des matériaux de remplissage produisant des poussières dangereuses. En outre, les résines à base de formaldéhyde peuvent libérer du formaldéhyde pendant le meulage. En tout état de cause, le volume de poussières dégagées par le meulage exige un système de ventilation avec aspiration localisée. Le problème est plus difficile à résoudre dans le cas des meuleuses portatives, bien que des résultats satisfaisants aient été obtenus avec des systèmes de captage à faible volume et à grande vitesse. Les travailleurs devraient éviter un travail trop prolongé et porter s'il le faut un équipement de protection respiratoire. Une ventilation par extraction est également nécessaire dans la plupart des opérations de ponçage sur bande, de finition, de polissage, etc. Dans le cas du brunissage notamment, les poussières d'origine textile combustibles présentent un risque sérieux.

Des vêtements de protection, des installations sanitaires modernes et des douches sont indispensables. Une surveillance médicale est souhaitable, notamment dans le cas du meulage des métaux.

## **LES LUBRIFIANTS INDUSTRIELS, LES FLUIDES D'USINAGE DES MÉTAUX ET LES HUILES POUR MOTEURS AUTOMOBILES**

*Richard S. Kraus*

La révolution industrielle n'aurait pas été possible sans la mise au point d'un certain nombre de produits du raffinage du pétrole, tels que les huiles industrielles, les lubrifiants, les huiles de coupe et les graisses. Avant les années mille huit cent soixante, au cours desquelles on découvrit que l'on pouvait obtenir un lubrifiant de qualité supérieure en distillant du pétrole brut sous vide, les industriels étaient tributaires, pour la lubrification des pièces mobiles, d'huiles naturelles et de graisses animales telles que l'huile de lard ou de blanc de baleine. Ces huiles et ces graisses animales étaient particulièrement sujettes à fusion, oxydation et décomposition du fait de l'exposition à la chaleur et à l'humidité dégagées par les machines à vapeur qui, à l'époque, actionnaient la quasi-totalité des équipements industriels. L'évolution des produits de raffinage du pétrole s'est poursuivie, depuis le premier lubrifiant, utilisé pour le tannage du cuir, jusqu'aux huiles et graisses de synthèse que nous connaissons aujourd'hui, avec leur durée de vie plus longue, leur pouvoir lubrifiant accru et leur meilleure résistance aux variations climatiques et de température.

#### **Les lubrifiants industriels**

Toutes les pièces mobiles des machines et des appareillages doivent être lubrifiées. Bien que la lubrification puisse être assurée par des matériaux solides tels que le polytétrafluoroéthylène (Teflon) ou le graphite, adoptés pour des pièces comme les paliers de petits moteurs électriques, les huiles et les graisses restent les lubrifiants les plus communément utilisés. A mesure que les machines gagnent en complexité, on exige des lubrifiants et des fluides d'usinage des métaux de plus en plus performants. La gamme des huiles s'étend aujourd'hui des huiles claires, très fluides, destinées à lubrifier des appareillages délicats, aux huiles épaisses noires et très visqueuses employées sur d'énormes mécanismes comme on en trouve dans les aciéries. Des huiles aux spécifications très précises sont utilisées à la fois dans les systèmes hydrauliques et pour la lubrification de puissantes machines-outils à commande numérique, telles que celles employées par l'industrie aéronautique pour obtenir des pièces aux tolérances extrêmement serrées. Quant aux huiles, fluides et graisses de synthèse, et aux mélanges d'huiles synthétiques et minérales, on y recourt lorsqu'on recherche un lubrifiant plus durable, comme dans le cas des moteurs électriques lubrifiés à vie, quand l'allongement de l'intervalle entre deux vidanges compense le surcoût, lorsqu'on a affaire à d'importants écarts de température et de pression comme dans l'aéronautique, ou lorsqu'il est difficile et coûteux de procéder à une nouvelle application de lubrifiant.

#### **Les huiles industrielles**

Les huiles industrielles telles que les huiles à broches et de graissage, les huiles à engrenages, les huiles turbines, les liquides hydrauliques ou de transmissions sont conçues pour satisfaire à des exigences physiques et chimiques spécifiques, et pour pouvoir fonctionner sans altération perceptible pendant de longues durées dans des conditions variables. Les lubrifiants destinés à l'industrie aéronautique doivent répondre à des impératifs entièrement nouveaux de propreté, de durabilité, de résistance aux rayonnements cosmiques et d'aptitude à fonctionner à des températures extrêmement hautes ou basses, en apesanteur et dans le vide.

Les transmissions, les turbines et les systèmes hydrauliques emploient des liquides pour transmettre la puissance ou l'énergie, des réservoirs pour contenir ces liquides, des pompes pour assurer leur circulation et des composants tels que soupapes, conduites, refroidisseurs ou filtres. Ils exigent des liquides de viscosité particulière et chimiquement stables pour pouvoir fonctionner sans à-coups et transmettre la puissance dans les conditions requises. Les liquides hydrauliques et les huiles turbines de qualité se caractérisent par un indice de viscosité et un pouvoir lubrifiant élevés, une bonne stabilité thermique, une longue durée de vie dans les systèmes de circulation, une résistance aux dépôts, des propriétés démoissantes, une protection antirouille et une bonne désémulsibilité.

Les huiles à engrenages sont conçues pour former des films résistants, assurant la lubrification des engrenages sous des pressions extrêmes. Elles doivent se caractériser par une bonne stabilité chimique, une désémulsibilité et une résistance à l'épaississement et à la formation de dépôts. Les huiles à broches sont des huiles fluides, très propres et très claires, contenant des additifs d'onctuosité. Les caractéristiques les plus importantes des huiles de mouvements, servant à lubrifier deux glissières planes coulissant sous haute pression et à faible vitesse, sont l'onctuosité et la pégeosité pour assurer la continuité du film et résister aux pressions extrêmes.

Les huiles pour cylindres et compresseurs conjuguent les caractéristiques des huiles industrielles et des huiles pour moteurs. Elles doivent résister à l'accumulation de dépôts, servir d'agent de transfert thermique (cylindres de moteurs à combustion interne), assurer la lubrification des cylindres et des pistons, constituer une étanchéité s'opposant au passage des gaz de combustion, offrir une bonne stabilité chimique et thermique (cas de l'huile de pompe à vide, notamment), présenter un indice de viscosité élevé et résister au délavage par l'eau (cylindres de machines à vapeur) et à la détergence.

### Les huiles pour moteurs automobiles

Les fabricants de moteurs thermiques et leurs associations, telles que la Société des ingénieurs automobiles (Society of Automotive Engineers (SAE)), aux États-Unis et au Canada, ont fixé des critères de performances spécifiques concernant les huiles pour moteurs automobiles. Les huiles pour moteurs automobiles à essence et diesel sont soumises à une série d'essais de fonctionnement destinés à en déterminer la stabilité chimique et thermique, la résistance à la corrosion, la viscosité, le pouvoir antiusure, l'onctuosité, la détergence et les performances à hautes et basses températures. Elles sont ensuite classées selon un code qui permet aux utilisateurs de déterminer si elles conviennent pour les usages sévères ainsi qu'aux différentes gammes de températures et de viscosité.

Pour pouvoir résister aux changements de viscosité liés aux variations de température, les huiles pour moteurs automobiles, transmissions et boîtes de vitesses sont conçues pour présenter des indices de viscosité élevés. Les huiles pour moteurs automobiles, destinées à lubrifier des moteurs à combustion interne, sont spécialement formulées pour résister à la décomposition sous l'effet de la chaleur. Elles ne doivent être ni trop épaisses, de manière à pouvoir lubrifier les parties mobiles même au démarrage par temps froid, ni devenir trop fluides à plein régime. Elles tendent à empêcher l'accumulation de calamine sur les soupapes, les segments et les cylindres, ainsi que la formation d'acides ou de dépôts corrosifs dus à l'humidité. Les huiles pour moteurs automobiles contiennent des détergents capables de retenir en suspension les particules charbonneuses et métalliques d'usure afin qu'elles puissent être arrêtées par des filtres que traverse l'huile au lieu de s'accumuler sur les organes internes et les endommager.

### Les liquides de coupe

Les trois types de liquides de coupe employés dans l'industrie sont les huiles minérales, les huiles solubles et les liquides synthétiques.

Les huiles de coupe sont généralement constituées d'un mélange d'huiles minérales de haute qualité, d'une grande stabilité, de viscosités diverses, avec des additifs destinés à leur conférer des caractéristiques spécifiques en fonction du matériau à usiner et de la nature du travail à exécuter. Les lubrifiants émulsionnables dans l'eau sont des huiles minérales (ou des huiles synthétiques) qui contiennent des émulsifiants et des additifs spéciaux tels que des agents antimoussants, des agents antirouille, des détergents, des bactéricides et des germicides. Avant usage, ils sont dilués dans l'eau selon des proportions variables. Plutôt que des émulsions, les liquides de coupe synthétiques sont des solutions de liquides non dérivés du pétrole, d'additifs et d'eau; certains d'entre eux, réservés à l'usinage de métaux spéciaux, sont ininflammables. Les liquides semi-synthétiques contiennent 10 à 15% d'huiles minérales. Pour éviter les problèmes posés par la tendance des liquides à fuir et à entrer en mélange avec d'autres liquides dans certaines machines-outils telles que les tours multibroches de décolletage, certains liquides spéciaux sont dotés à la fois des caractéristiques d'une huile de graissage et de celles d'un liquide de coupe.

Les caractéristiques exigées pour les liquides de coupe dépendent de la composition du métal à usiner, de l'outil employé et de la nature de l'opération (coupe, rabotage ou travail à l'étau-limeur). Les liquides de coupe améliorent le processus d'usinage par refroidissement et par lubrification (protection de l'arête de l'outil). S'il s'agit, par exemple, d'usiner un métal tendre qui dégage beaucoup de chaleur, c'est le refroidissement qui sera le critère le plus important. On améliore le refroidissement en utilisant une huile légère (kérosène, par exemple) ou un liquide de coupe à base d'eau. Pour éviter la formation d'arêtes rapportées sur les outils de coupe, on fait appel à des additifs antisoudage ou antiusure tels que des composés soufrés, chlorés et phosphorés. L'onctuosité, importante pour lutter contre le pouvoir abrasif du sulfure de fer lors de l'usinage de l'acier, est assurée par des graisses synthétiques et animales ou des additifs à base d'huile de blanc de baleine sulfurisée.

### Autres huiles utilisées pour le travail et l'usinage des métaux

Les liquides de meulage assurent le refroidissement et empêchent l'encrassement des meules par le métal. Ils se caractérisent par leur stabilité thermique et chimique, leurs propriétés antirouille (liquides solubles), leur capacité à empêcher les dépôts poisseux à l'évaporation et un point d'éclair assurant la sécurité dans l'exécution du travail.

Les huiles de trempe, dont la stabilité doit être très élevée, sont employées dans le traitement thermique pour maîtriser les modifications de la structure moléculaire de l'acier pendant son refroidissement. La trempe dans une huile plus fluide est pratiquée pour la cémentation de petites pièces d'acier peu coûteuses. On utilise une vitesse de trempe plus lente pour conférer aux aciers pour machines-outils une couche superficielle d'une assez grande dureté tout en réduisant les contraintes internes. On se sert aussi d'huile pour la trempe étagée des aciers à haute teneur en carbone et en alliages.

Les huiles de laminage sont des huiles minérales ou solubles spécialement formulées pour lubrifier et conférer une surface lisse aux métaux, notamment l'aluminium, le cuivre et le laiton, lorsqu'ils passent dans les laminoirs à chaud et à froid. Les huiles de démoulage servent à enduire les matrices et les moules en vue de faciliter le démoulage des pièces métalliques fabriquées. Des huiles de tannage sont encore utilisées dans les industries du feutre et du cuir. Les huiles isolantes sont des liquides diélectriques de formulation spéciale, utilisés dans les transformateurs ainsi que dans les disjoncteurs et commutateurs électriques de grande dimension.

Les huiles caloporteurs mises en œuvre dans des systèmes ouverts ou fermés peuvent assurer jusqu'à quinze ans de service.

Leurs principales caractéristiques sont une bonne stabilité thermique — indispensable dans la mesure où les systèmes fonctionnent à des températures comprises entre 150 et 315 °C —, une stabilité à l'oxydation et un point d'éclair élevé. Dans des conditions normales, ces huiles sont trop visqueuses pour pouvoir être pompées à température ambiante; il faut donc les chauffer pour leur conférer la fluidité nécessaire.

Les solvants issus du pétrole servent à nettoyer les pièces par pulvérisation, égouttage ou trempage. Ils éliminent l'huile et émulsionnent les impuretés et les particules métalliques. Les huiles anti-rouille peuvent être à base de solvants ou d'eau. On les applique par trempage ou pulvérisation sur des bobines de tôle, roulements et autres pièces en acier inoxydable; elles laissent sur les surfaces métalliques des pellicules polarisées ou cireuses qui offrent une protection contre les traces de doigts et la rouille, et contre les projections d'eau.

### Les graisses

Les graisses sont des mélanges de liquides, d'épaississants et d'additifs qui servent à lubrifier les pièces et les appareillages où l'on ne peut pas retenir l'huile, qui sont difficiles d'accès ou pour lesquels les fuites ou éclaboussures de lubrifiants liquides pourraient être sources de contamination des produits ou de danger. La gamme de leurs applications et des caractéristiques requises est très large: depuis le graissage des roulements de moteurs à réaction à des températures inférieures à zéro jusqu'à la lubrification d'engrenages de laminoirs à chaud, en passant par la résistance au délavage à l'eau ou aux acides et la résistance au frottement continu sur les roulements à rouleaux des roues de voitures de chemins de fer, etc.

Les graisses sont obtenues par incorporation de savons métalliques (sels d'acides gras à longue chaîne) dans un milieu à base d'huile lubrifiante à des températures comprises entre 205 et 315 °C. Les liquides utilisés dans les graisses de synthèse peuvent être des liquides esters, des esters de silicone ou phosphoriques ainsi que des polyalkylène glycols. Les caractéristiques de la graisse dépendent dans une grande mesure du liquide employé, de l'élément métallique (calcium, sodium, aluminium, lithium, etc.) présent dans le savon, ainsi que des additifs utilisés pour améliorer les performances et la stabilité et réduire le frottement. Ces additifs peuvent être des additifs extrême pression qui recouvrent le métal d'une fine couche de composés sulfurés métalliques non corrosifs, de naphthénate de plomb ou de dithiophosphate de zinc, des anti-rouilles, des antioxydants, des acides gras pour plus d'onctuosité, des additifs de pégo-sité, des colorants servant à l'identification et des inhibiteurs d'eau. Certaines graisses contiennent parfois des charges au graphite ou au molybdène qui recouvrent les pièces métalliques et continuent d'assurer la lubrification après épuisement ou décomposition de la graisse.

### Les additifs des lubrifiants industriels, des graisses et des huiles pour moteurs automobiles

En plus des bases lubrifiantes de haute qualité se caractérisant par leur stabilité chimique et thermique et leurs indices de viscosité élevés, il est nécessaire d'employer des additifs pour améliorer le produit et apporter les caractéristiques spécifiques que requièrent les lubrifiants industriels, les liquides de coupe, les graisses et les huiles pour moteurs automobiles. Les additifs les plus couramment utilisés — mais il en est d'autres — sont les suivants:

- les *antioxydants*. Les inhibiteurs d'oxydation tels que l'hydroxytoluène butylé et la phénylnaphtylamine retardent l'altération de l'huile en cassant les longues chaînes de molécules qui se forment en cas d'exposition à l'oxygène. Les antioxydants sont utilisés comme revêtement des métaux tels que le cuivre, le zinc et le plomb pour empêcher le contact avec l'huile de manière que ces métaux ne deviennent pas des catalyseurs, ce qui accé-

lérait l'oxydation, avec formation d'acides susceptibles d'attaquer d'autres métaux;

- les *antimousses*. Les démousants tels que les silicones et les siloxanes polyorganiques sont utilisés dans les huiles hydrauliques, les huiles pour engrenages, les liquides de transmission et les huiles turbines pour réduire la tensioactivité et favoriser l'évacuation de l'air piégé dans l'huile au niveau des pompes et des compresseurs de manière à maintenir une pression hydraulique constante et à prévenir la cavitation;
- les *inhibiteurs de corrosion*. Les anti-rouilles tels que le naphthénate de plomb et le sulfonate de sodium servent à empêcher la formation de rouille sur les pièces et dans les circuits en cas de contamination de l'huile par de l'eau ou de l'air humide ayant pénétré dans les réservoirs du système pendant le refroidissement après l'arrêt de l'appareil ou de la machine;
- les *additifs antiusure*. Les additifs antiusure tels que le phosphate de tricrésyle forment des composés polaires qui sont attirés par les surfaces métalliques où ils apportent une couche de protection supplémentaire pour le cas où le film d'huile ne suffirait pas;
- les *améliorants d'indice de viscosité*. Ils permettent aux huiles de mieux résister aux effets des changements de température. Malheureusement, leur efficacité diminue avec la durée d'emploi. Les huiles de synthèse sont conçues avec des indices de viscosité très élevés, ce qui leur permet de conserver leur structure pour des gammes de températures plus larges et pendant des durées beaucoup plus longues que les huiles minérales ayant reçu des additifs de viscosité;
- les *désémulsifiants*. Les inhibiteurs d'eau et les composés spéciaux séparent l'eau de l'huile et empêchent la formation de gomme; ils contiennent des huiles cireuses qui apportent un surcroît d'onctuosité. Ils sont utilisés pour les équipements exposés aux projections d'eau ou à une forte humidité, comme c'est le cas des cylindres de machines à vapeur, des compresseurs d'air et des boîtes de vitesses de machines-outils contaminés par des liquides de coupe solubles;
- les *colorants*. Ils servent à repérer les huiles selon leur destination (liquides de transmission ou huiles pour engrenages, par exemple) de façon à éviter des erreurs;
- les *additifs extrême pression*. Les additifs extrême pression, tels que les composés gras sulfurés non corrosifs, le dithiophosphate de zinc et le naphthénate de plomb, sont utilisés dans les huiles pour moteurs, les engrenages et les transmissions où ils forment des revêtements qui protègent les surfaces métalliques lorsque le film d'huile protectrice est affaibli ou rompu et ne peut plus empêcher le contact métal sur métal;
- les *détergents*. Les détergents aux sulfonates et aux phénates métalliques servent à maintenir les impuretés, la calamine et les particules d'usure métalliques en suspension dans les huiles hydrauliques, les huiles pour engrenages, pour moteurs et les liquides de transmission. Au passage de l'huile à travers un filtre, ces contaminants sont arrêtés, ce qui les empêche de circuler de nouveau dans des organes mécaniques où ils pourraient causer des dommages;
- les *additifs de pégo-sité*. Ils permettent aux huiles de résister aux risques de fuite en adhérant aux surfaces des roulements, des engrenages sous carter ou des pignons nus de grandes dimensions que l'on trouve sur les laminoirs, les engins de travaux publics et les ponts roulants. Plus la durée de service se prolonge cependant, plus les propriétés d'adhérence diminuent;
- les *émulsifiants*. Les acides gras et les huiles grasses sont utilisés comme émulsifiants dans les huiles solubles pour faciliter la formation de solutions avec l'eau;
- les *additifs d'onctuosité*. On emploie lard, suif, blanc de baleine et huiles végétales dans les huiles de coupe et dans certaines huiles pour engrenages afin d'en accroître l'onctuosité;

- les *bactéricides*. On ajoute des bactéricides et des germicides tels que le phénol et l'essence de pin aux huiles de coupe solubles pour prolonger leur durée de vie, en maintenir la stabilité, limiter les odeurs et prévenir les dermatites.

### La fabrication des lubrifiants industriels et des huiles pour moteurs automobiles

Les lubrifiants industriels ainsi que les huiles, les graisses, les liquides de coupe et les huiles pour moteurs automobiles sont fabriqués par mélange et conditionnés dans des installations spécialisées. Ces installations sont souvent implantées à l'intérieur ou à proximité des raffineries qui produisent les huiles de base; elles peuvent aussi en être situées à une certaine distance et recevoir les bases par navires-citernes ou barges, wagons ou camions-citernes. Elles ont pour fonction de mélanger des additifs aux huiles de base en vue de fabriquer un large éventail de produits finis qui seront ensuite expédiés en vrac ou conditionnés sous diverses formes.

Les procédés de mélange appliqués pour la fabrication des lubrifiants, liquides ou graisses dépendent du degré d'ancienneté et de perfectionnement des installations, des équipements disponibles, de la nature et de la formulation des additifs mis en œuvre, ainsi que de la diversité et du volume des produits fabriqués. Le procédé peut se résumer à un mélange physique des bases et des additifs dans une cuve équipée de mélangeurs, de palettes ou d'agitateurs à air, ou impliquer en outre un apport de chaleur par des serpentins électriques ou à vapeur pour faciliter la dissolution et le mélange des additifs. D'autres liquides et lubrifiants industriels sont fabriqués par un procédé automatique en mélangeant des bases avec des additifs et des huiles prémélangées au moyen de divers systèmes. Le mélange des graisses peut se faire par lots ou en continu. Les fabricants de lubrifiants composent leurs propres additifs à partir de produits chimiques ou achètent auprès d'entreprises spécialisées des additifs déjà conditionnés, les deux méthodes étant susceptibles d'être employées dans une même usine. Quand les producteurs de lubrifiants fabriquent et conditionnent eux-mêmes leurs additifs, ils peuvent avoir à employer des températures et des pressions élevées, tout en devant maîtriser les réactions chimiques et l'agitation physique des produits.

Après la fabrication, les fluides et les lubrifiants sont laissés dans les mélangeuses ou transférés dans des réservoirs d'attente, ce qui permet de contrôler que les additifs demeurent en suspension ou en solution, de procéder aux essais de conformité du produit aux spécifications de qualité et aux conditions d'homologation, et de laisser les produits refroidir jusqu'à la température ambiante avant conditionnement et expédition. Quand les essais sont terminés, le transfert des produits finis est autorisé vers l'expédition en vrac ou le conditionnement.

Les produits finis sont expédiés en vrac à bord de wagons-citernes ou de camions-citernes directement aux utilisateurs, aux distributeurs ou aux usines extérieures de conditionnement. Ils peuvent également être livrés aux utilisateurs et aux distributeurs par wagons couverts ou par transporteurs routiers sous différents conditionnements:

- des grands récipients pour vrac en métal, en plastique, en métal/plastique ou en plastique armé, d'une capacité de 227 à 2 840 l environ, expédiés à l'unité sur palette incorporée ou non, empilés sur une à deux hauteurs;
- des fûts en métal, en composite ou en plastique d'une capacité de 208 l, 114 l ou 180 kg, généralement expédiés à raison de 4 par palette;
- des barils en métal ou en plastique d'une capacité de 60 l ou 54 kg et des seaux en métal ou plastique de 19 l ou 16 kg, gerbés sur palettes puis cerclés ou banderolés pour en assurer la stabilité;

- des bidons en métal ou en plastique d'une capacité de 8 l ou 4 l; les flacons et boîtes de 1 l en plastique, en métal ou en composite ainsi que les cartouches de graisse de 2 kg sont conditionnés en cartons, gerbés sur palettes puis cerclés ou banderolés en vue de l'expédition.

Il peut arriver que certaines entreprises de mélange et de conditionnement expédient directement à de petits consommateurs des palettes réunissant un assortiment de produits et de conditionnements. La palette destinée à une station-service regroupera, par exemple, 1 fût de liquide pour transmissions, 2 barils de graisse, 8 caisses d'huile pour moteurs et 4 seaux de lubrifiant pour engrenages.

### La qualité des produits

Qu'il s'agisse d'assurer le bon état de marche des machines et des appareils ou de produire des pièces et des matériaux de qualité, la qualité des lubrifiants revêt une importance considérable. Les entreprises qui réalisent les mélanges et le conditionnement fabriquent des produits pétroliers finis qui satisfont à des spécifications et à des normes de qualité très strictes. Il appartient aux utilisateurs de préserver ce niveau de qualité par la mise en œuvre de bonnes pratiques de manutention, d'entreposage, de prélèvement et de transvasement des lubrifiants depuis le récipient ou réservoir d'origine jusqu'à l'appareil distributeur, au point de graissage sur la machine, à l'appareil à lubrifier ou au circuit à remplir. Certains établissements industriels se sont dotés de systèmes centralisés pour la distribution, la lubrification et l'hydraulique qui permettent de réduire à un minimum la contamination et l'exposition. Les huiles industrielles, les lubrifiants, les huiles de coupe et les graisses se dégradent sous l'effet de la contamination par l'eau ou l'humidité, de l'exposition à des températures trop élevées ou trop basses, du mélange accidentel avec d'autres produits et d'un entreposage prolongé risquant d'entraîner une perte d'efficacité des additifs ou des altérations chimiques.

### La sécurité et la santé

Dans la mesure où ils doivent être utilisés et manipulés par les consommateurs, les produits finis destinés à l'industrie et aux véhicules automobiles doivent être relativement exempts de risques. En fait, c'est lors du mélange des produits, de la manipulation des additifs, de l'utilisation des liquides de coupe et de la mise en œuvre des systèmes de lubrification par brouillard d'huile que les risques d'exposition sont les plus réels.

On trouvera au chapitre n° 78, «Le raffinage du pétrole», de l'*Encyclopédie*, consacré aux raffineries de pétrole et de gaz naturel des informations concernant les risques potentiels liés, dans les usines de mélange et de conditionnement, aux installations auxiliaires telles que salles des chaudières, laboratoires, bureaux, séparateurs huile-eau et installations de traitement des déchets, installations portuaires, réservoirs de stockage, entrepôts, rampes de chargement pour wagons-citernes et camions-citernes, ainsi qu'installations de chargement et de déchargement pour wagons couverts et véhicules routiers.

### La sécurité

La fabrication d'additifs et de suspensions épaisses, la composition par lots, ainsi que les opérations de mélange par lots ou en continu exigent des procédures très strictes pour conserver au produit la qualité souhaitée et, conjuguées au port d'équipements de protection individuelle, pour réduire à un minimum l'exposition aux substances chimiques et aux matières potentiellement dangereuses ainsi que les contacts avec les surfaces brûlantes et la vapeur. Les fûts et récipients d'additifs doivent être stockés dans des conditions de sécurité appropriées et rester hermétiquement fermés jusqu'au moment de leur utilisation. Les additifs en fûts et

en sacs doivent être manipulés dans les règles pour éviter les efforts excessifs. Les substances chimiques dangereuses seront convenablement stockées, les produits chimiques incompatibles ne devant pas être entreposés dans des endroits où ils risquent de se mélanger. La conduite des machines assurant le remplissage et le conditionnement suppose un certain nombre de précautions; il s'agit, notamment, de porter des gants et d'éviter de se prendre les doigts dans les sertisseuses. On ne devrait pas enlever, débrancher ou court-circuiter les carters et autres systèmes de protection sous le prétexte d'aller plus vite. Les cuves et les fûts devraient être inspectés avant remplissage pour vérifier qu'ils sont propres et en bon état.

Un système d'autorisations de travail en espace confiné devrait être instauré pour l'accès aux réservoirs de stockage et aux mélanges aux fins de nettoyage, d'inspection, d'entretien ou de réparation. Une procédure de consignation/déconsignation devrait être établie et appliquée pour toute intervention sur les machines de conditionnement, les mélangeuses, les transporteurs à bande, les palettiseurs et autres appareillages comportant des parties mobiles.

Les fûts et les récipients présentant des fuites devraient être retirés de la zone de stockage, et les sols sur lesquels des produits ont été renversés accidentellement devraient être nettoyés de façon à prévenir les glissades et les chutes. Les opérations de recyclage, d'incinération et d'élimination des lubrifiants, huiles pour moteurs automobiles et liquides de coupe répandus ou usés devraient être exécutées conformément à la réglementation nationale et aux procédures définies par l'entreprise. Les travailleurs appelés à nettoyer les débords accidentels et à manipuler des produits usés devraient porter un équipement de protection individuelle adapté. Les huiles de vidange de moteurs, les liquides de coupe ou lubrifiants industriels susceptibles d'avoir été contaminés par de l'essence et des solvants inflammables devraient être stockés à l'abri des sources d'inflammation avant d'être éliminés.

### La protection contre l'incendie

Même si les opérations de mélange des lubrifiants destinés à l'industrie et à l'automobile présentent moins de risques d'incendie que le raffinage, les températures élevées et les produits à bas point d'éclair indispensables à la fabrication des graisses et des huiles d'usinage imposent de veiller à la sécurité. Il est nécessaire de prendre des précautions spéciales pour la distribution des produits ou le remplissage de récipients à des températures supérieures à leur point d'éclair. Pour transvaser des liquides inflammables d'un récipient à un autre, des techniques appropriées d'égalisation du potentiel et de mise à la terre devraient être appliquées, afin d'empêcher l'accumulation d'électricité statique et toute décharge électrique. Les moteurs électriques et les appareils électroportatifs devraient être dûment autorisés pour la classe de risque s'appliquant aux zones où ils sont installés ou utilisés.

Il y a risque d'incendie si des produits ou des vapeurs s'échappent des zones de mélange des lubrifiants, de préparation des graisses ou des aires de stockage entrent en contact avec une source d'inflammation. Il devrait être envisagé d'établir et d'appliquer un système de permis de feu (travaux par points chauds) pour prévenir les incendies dans les installations de mélange et de conditionnement. Les cuves de stockage installées à l'intérieur des bâtiments devraient être conçues, ventilées et protégées conformément aux prescriptions légales et aux règles de l'entreprise. Les produits stockés sur des rayonnages ou empilés ne devraient pas bloquer l'accès aux systèmes de lutte contre l'incendie, aux portes coupe-feu ni aux issues de secours.

Le stockage des produits finis, en vrac ou sous divers conditionnements, devrait être conforme aux pratiques admises et à la réglementation en matière de prévention des incendies. Les liquides inflammables et les additifs en solution dans des liquides inflammables peuvent, par exemple, être stockés dans des bâti-

ments extérieurs ou dans des magasins distincts, spécialement conçus, à l'intérieur des bâtiments ou dans des locaux adjacents. De nombreux additifs sont stockés dans des chambres chaudes (38 à 65 °C) ou très chaudes (à plus de 65 °C) pour maintenir les composants en suspension, abaisser la viscosité des produits épais ou faciliter le mélange. Ces locaux doivent être conformes à la réglementation en matière de classification électrique, d'évacuation des liquides, de ventilation et d'événements en cas d'explosion, surtout quand des liquides inflammables ou combustibles sont stockés et distribués à des températures supérieures à leur point d'éclair.

### La santé

Pour les opérations de mélange et de prélèvement, il conviendrait d'envisager le port d'équipements de protection individuelle et d'appareils de protection respiratoire afin d'éviter les expositions à la chaleur, à la vapeur d'eau, aux poussières, aux vapeurs nocives, aux fumées, aux sels métalliques, aux produits chimiques et aux additifs. Il pourra être nécessaire d'adopter des pratiques de travail minimisant les risques, des règles d'hygiène et un équipement de protection individuelle approprié en cas d'exposition à des vapeurs d'huile, à des fumées et des vapeurs nocives, à des additifs, au bruit et à la chaleur lors des travaux d'inspection et d'entretien, lors du prélèvement et de la manutention d'hydrocarbures et d'additifs, au cours de la fabrication et du conditionnement ainsi que lors du nettoyage des débords accidentels et des fuites de produits:

- le port de chaussures de travail à semelles antidérapantes, résistantes aux hydrocarbures, devrait être de rigueur pour le travail ordinaire, de même que celui de chaussures de sécurité avec embout d'acier, à semelles antidérapantes, résistantes aux hydrocarbures, en cas de risques de blessures aux pieds liés au roulement ou à la chute d'objets ou d'appareils;
- le port de lunettes de sécurité et d'une protection respiratoire peut être nécessaire en cas d'exposition dangereuse à des produits chimiques, à des poussières ou à de la vapeur;
- pour manipuler des substances chimiques, des additifs et des solutions caustiques dangereuses et pour nettoyer les débords accidentels de produits, les travailleurs devraient porter des gants, des tabliers imperméables et des chaussures étanches, des écrans faciaux et des lunettes résistant aux agressions chimiques;
- le port d'un casque peut être nécessaire en cas de travail dans des fosses ou dans des zones comportant un risque de blessures à la tête;
- des moyens de nettoyage et de séchage devraient être facilement et rapidement accessibles pour permettre de parer aux éclaboussures et débords accidentels de produits.

L'exposition aux hydrocarbures est une cause fréquente de dermatites, qu'il est facile de prévenir par le port d'un équipement de protection individuelle et une hygiène rigoureuse. On évitera le contact direct de la peau avec tout type de graisse ou de lubrifiant contenant des additifs. Les produits fluides tels que le kérosène, les solvants et les huiles à broches dissolvent la barrière lipidique de la peau et provoquent des éruptions. Quant aux produits plus visqueux, comme les huiles pour engrenages et les graisses, ils risquent en obstruant les pores de la peau de causer des folliculites.

Les risques pour la santé liés à la contamination microbienne des huiles peuvent être résumés comme suit:

- les risques d'aggravation d'affections cutanées préexistantes;
- les maladies respiratoires dues à des aérosols respirables de lubrifiants;
- les altérations de la composition du produit du fait de la présence de micro-organismes qui le rendent pathogène;
- les risques de contamination par des bactéries pathogènes provenant d'animaux, d'oiseaux ou d'êtres humains.

Des dermatites de contact peuvent apparaître chez les travailleurs exposés aux liquides de coupe pendant la fabrication, l'usinage ou l'entretien ou qui essuient leurs mains couvertes d'huile avec des chiffons chargés de minuscules particules métalliques susceptibles de provoquer des microcoupures de la peau qui risquent de s'infecter. Les liquides de coupe à base d'eau qui mouillent la peau et les vêtements peuvent contenir des bactéries et causer des infections, tandis que leurs émulsifiants sont susceptibles de dissoudre la barrière lipidique de la peau. La folliculite imputable à l'huile résulte d'une exposition prolongée à des fluides de coupe à base minérale due, par exemple, au port de vêtements imprégnés d'huile. Quand leurs vêtements sont trempés d'huile, les travailleurs devraient les retirer et les donner au nettoyage avant de les porter à nouveau. Les dermatites peuvent être dues également à l'emploi de savons, de détergents ou de solvants pour laver la peau. Le meilleur moyen de les éviter réside dans une bonne hygiène et consiste à réduire au minimum les expositions. En cas de problème cutané persistant, il convient de consulter un médecin.

Au cours d'une vaste enquête conduite pour servir de base à l'établissement de ses critères, l'Institut national de la sécurité et de la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)), aux États-Unis, a établi un lien entre l'exposition aux fluides d'usinage des métaux et le risque d'apparition de cancers de divers organes dont l'estomac, le pancréas, le larynx et le rectum (NIOSH, 1996). Les formulations spécifiquement responsables du risque élevé de cancers restent à déterminer.

L'exposition professionnelle aux brouillards et aux aérosols d'huile est associée à divers effets respiratoires non malins, parmi lesquels la pneumonie lipoïde, l'asthme, l'irritation aiguë des voies aériennes, la bronchite chronique et l'altération de la fonction pulmonaire (NIOSH, 1996).

Les fluides d'usinage des métaux sont facilement contaminés par des bactéries et des champignons susceptibles d'affecter la peau ou, en cas d'inhalation sous forme d'aérosols contaminés, d'entraîner des effets systémiques.

On utilise des procédés de raffinage tels que l'hydrofinition et le traitement acide pour extraire les aromatiques des lubrifiants industriels, tandis que l'emploi de bases naphthéniques a été restreint pour réduire le plus possible la cancérogénicité. Les additifs introduits lors du mélange peuvent également constituer un risque pour la santé. Les expositions à des composés contenant du chlore et du plomb, tels que ceux mis en œuvre dans certains lubrifiants et graisses pour engrenages, provoquent des irritations de la peau et peuvent être dangereuses. Le phosphate de tri-*o*-crésyle (employé normalement comme lubrifiant) a provoqué des cas de paralysie nerveuse lorsqu'il a été utilisé par erreur comme huile de cuisine. Les huiles synthétiques renferment essentiellement du nitrite de sodium, de la triéthanolamine et des additifs. La triéthanolamine du commerce contient de la diéthanolamine, susceptible de réagir en présence du nitrite de sodium pour former la N-nitrosodiéthanolamine, cancérogène relativement peu agressif, mais pouvant présenter un certain risque. Quant aux lubrifiants semi-synthétiques, ils présentent les risques des deux types de produits, ainsi que ceux des additifs qu'ils renferment.

L'information concernant la sécurité des produits revêt beaucoup d'importance pour les travailleurs, tant ceux des fabricants que ceux des utilisateurs de lubrifiants, d'huiles et de graisses. Les fabricants doivent disposer des fiches de données de sécurité (FDS) ou d'informations relatives aux produits pour tous les additifs et bases employés dans les mélanges et les compositions. De nombreuses entreprises ont procédé à des essais épidémiologiques et toxicologiques pour déterminer le niveau des risques d'effets sanitaires aigus et chroniques que pourraient présenter leurs produits. Ces informations devraient être mises à la disposition des travailleurs et des utilisateurs sous forme d'un étiquetage de sécurité et d'information sur la sécurité des produits.

## LE TRAITEMENT DE SURFACE DES MÉTAUX

*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\**

Il existe de nombreuses techniques de finition des surfaces des produits métalliques qui ont pour but de leur permettre de résister à la corrosion, de mieux s'ajuster et d'avoir meilleure apparence (voir tableau 82.7). Certains produits sont du reste successivement soumis à plusieurs de ces techniques. On trouvera décrites dans cet article les plus couramment utilisées.

Avant application de l'une quelconque de ces techniques, les produits doivent être nettoyés à fond. On a recours pour cela à un certain nombre de méthodes, appliquées séparément ou successivement. Il s'agit notamment du meulage, du brossage et du polissage (lesquels produisent des poussières de métaux ou d'oxydes métalliques — il est à noter que les poussières d'aluminium peuvent être explosives), du dégraissage à la vapeur, du lavage aux solvants organiques, du décapage en solutions acides ou alcalines concentrées et du dégraissage électrolytique. Cette dernière technique fait appel à l'immersion dans des bains contenant du cyanure et un alcali concentré dans lesquels l'hydrogène ou l'oxygène produits par l'électrolyse enlèvent la graisse, ce qui donne des surfaces métalliques absolument exemptes d'oxydes et de graisse. Ce nettoyage est suivi d'un rinçage et d'un séchage approfondis.

La conception même de l'équipement et une ventilation par aspiration localisée permettent de limiter les risques. Les travailleurs exposés au risque d'éclaboussures doivent être munis de lunettes protectrices ou d'écrans pour les yeux, ainsi que de gants, de tabliers et de combinaisons de protection. Douches et fontaines oculaires devraient être mises à la disposition du personnel et être en bon état de marche; éclaboussures et débords de liquides dangereux devraient être immédiatement épongés. Dans le cas de l'appareillage électrolytique, les gants et les chaussures doivent être non conducteurs; d'autre part, il faudrait prendre les précautions ordinaires en matière d'électricité, qu'il s'agisse de l'installation de disjoncteurs ou de procédures de consignation/déconsignation.

### Les traitements

#### *Le polissage électrolytique*

Le polissage électrolytique est un traitement destiné à améliorer l'aspect et le pouvoir réflecteur d'une surface métallique, à enlever le métal en excès de manière à obtenir des dimensions rigoureusement exactes et à préparer une surface en vue d'en éliminer les défauts. Le procédé met à profit le phénomène de dissolution anodique, qui s'exerce préférentiellement sur les aspérités de la surface. Le traitement est précédé d'un dégraissage en phase vapeur et d'un nettoyage en bain alcalin chaud. Etant donné que les solutions électrolytiques sont souvent acides, un bon rinçage est indispensable.

#### *L'électrodéposition*

Ce terme recouvre un ensemble de procédés chimiques ou électrochimiques qui permettent d'appliquer au produit une couche métallique, du nickel par exemple, pour le protéger contre la corrosion, du chrome dur pour en améliorer les propriétés de surface, ou encore de l'argent et de l'or pour le valoriser. Des matériaux non métalliques sont parfois même utilisés. Le produit à traiter, qui représente la cathode, et une anode du métal à

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



Tableau 82.7 • Résumé des risques liés aux différentes méthodes de traitement des métaux

| Méthode de traitement des métaux   | Risques   | Précautions  |
|------------------------------------|---|--|
| Polissage électrolytique           | Brûlures et irritations causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs  | Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration   |
| Electrodéposition                  | Exposition au chrome et au nickel, métaux potentiellement cancérogènes; exposition aux cyanures; brûlures et irritations causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs; choc électrique; s'il s'agit d'un procédé humide, risque de glissade et de chute; risque de production de poussières explosibles; risques ergonomiques           | Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration, faisant souvent appel à un système symétrique à fente. Nettoyer immédiatement les débords de produits. Poser un plancher antidérapant. Concevoir les procédures de travail et les postes de travail de manière à éviter les contraintes ergonomiques |
| Emallage et glaçure                | Risques physiques des broyeurs, transporteurs, mélangeuses; risques de brûlures par des liquides et des équipements à haute température; exposition à des poussières pouvant être cause de maladies pulmonaires   | Protéger les machines au moyen de capots, avec dispositifs de verrouillage. Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration afin d'éviter l'exposition aux poussières. Le recours à un équipement pourvu d'un filtre à particules à haute efficacité peut s'imposer                                   |
| Traitement à l'acide               | Exposition à l'acide fluorhydrique; brûlures et irritations causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs; risque de brûlures par des liquides et des équipements à haute température  | Instaurer un programme permettant d'éviter l'exposition à l'acide fluorhydrique. Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration  |
| Galvanisation                      | Risque de brûlures par des liquides, des métaux et des équipements à haute température; brûlures et irritations causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs; fièvre des fondeurs; risque d'exposition au plomb   | Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration. Instaurer un programme de réduction/surveillance de l'exposition au plomb  |
| Traitement thermique               | Risque de brûlures par des liquides, des métaux et des équipements à haute température; brûlures et irritation causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs; risque d'atmosphère d'hydrogène explosive; risque d'exposition au monoxyde de carbone; risque d'exposition aux cyanures; risque d'incendie au cours de la trempe à l'huile | Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration. Placer des écriteaux signalant les équipements et les surfaces à haute température. Installer des systèmes de surveillance de la concentration en monoxyde de carbone. Installer des systèmes efficaces de lutte contre l'incendie                   |
| Métallisation                      | Risque de brûlures par des métaux et des équipements à haute température; risque d'explosion due aux poussières ou à l'acétylène; fièvre des zingueurs  | Installer des systèmes efficaces de lutte contre l'incendie. Bien séparer les produits chimiques des gaz. Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration   |
| Phosphatation                      | Brûlures et irritations causées par des produits chimiques caustiques et corrosifs  | Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration   |
| Revêtement de plastique            | Exposition à des sensibilisants chimiques   | Chercher des produits de remplacement aux sensibilisants. Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration   |
| Application de peintures primaires | Exposition à divers solvants potentiellement toxiques et inflammables; exposition à des sensibilisants chimiques; exposition au chrome, métal pouvant être cancérogène  | Chercher des produits de remplacement aux sensibilisants. Utiliser un équipement de protection individuelle. Installer un système efficace de ventilation par aspiration. Bien séparer les produits chimiques des gaz  |

déposer sont immergés dans une solution électrolytique (laquelle peut être acide, alcaline ou alcaline avec sels de cyanure et complexes) et reliés extérieurement à une source de courant continu. Les cations de l'anode métallique, chargés positivement, migrent vers la cathode où ils se déposent en fine couche (voir figure 82.6). Le procédé se poursuit jusqu'à ce que le revêtement ait l'épaisseur souhaitée, après quoi le produit est extrait de la cuve, lavé, séché et poli.

Anode:  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ ; cathode:  $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$

Avec l'*électroformage*, procédé étroitement apparenté à l'électrodéposition, des objets moulés, en plâtre ou en plastique, par exemple, sont rendus conducteurs par application de graphite, puis plongés dans un bain en tant que cathode pour recevoir le métal.

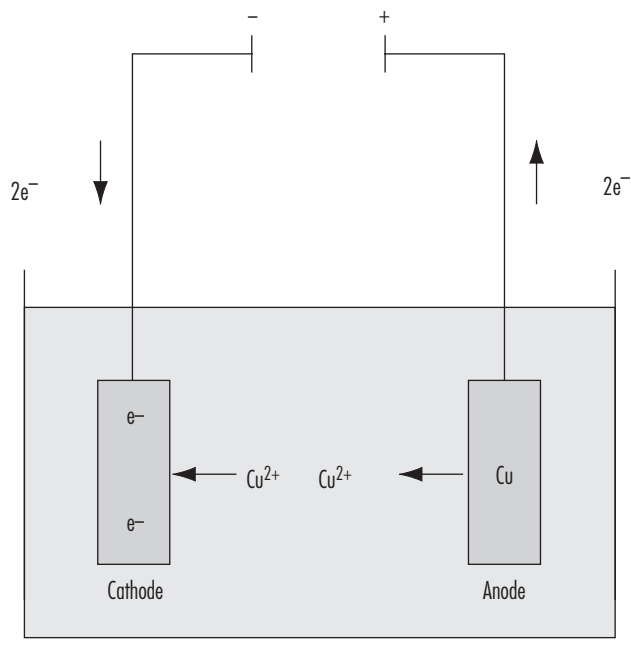
Avec l'*anodisation*, procédé qui a pris de plus en plus d'importance ces dernières années, des produits en aluminium (ou encore

en titane et autres métaux) formant l'anode sont immergés dans l'acide sulfurique dilué. Mais, au lieu que des ions d'aluminium positifs aillent se déposer sur la cathode, ces produits sont oxydés par les atomes d'oxygène qui se forment à l'anode et se lient à cette dernière pour constituer une couche d'oxyde. Celle-ci est partiellement dissoute par l'acide sulfurique en solution, ce qui rend la couche superficielle poreuse. On peut ensuite déposer dans ces pores des matériaux colorés ou sensibles à la lumière pour fabriquer divers objets, des plaques indicatrices, par exemple.

#### Les émaux et les glaçures

L'émail vitrifié dont on recouvre certains métaux, principalement l'acier et le fer, pour les protéger contre la corrosion, les chocs thermiques et les taches, entre dans la fabrication de nombreux articles: baignoires, cuisinières électriques ou à gaz, ustensiles de cuisine, cuves et réservoirs divers, matériel électrique, etc. L'émail sert également à décorer la céramique, le verre, les pièces d'orfè-

Figure 82.6 • Représentation schématique de l'électrodéposition



vrerie ou d'ornement. La poudre d'émail est employée depuis plusieurs siècles en décoration (émaux cloisonnés, émaux de Limoges). Le type d'émail appelé glaçure est employé pour la poterie.

Les émaux et les glaçures sont fabriqués à l'aide des matériaux suivants :

- des produits réfractaires tels que le quartz, le feldspath ou l'argile;
- des fondants, tels que le borax (tétraborate de sodium décahydraté), la soude (carbonate de sodium), le nitrate de sodium, le fluor spar, la cryolithe, le carbonate de baryum, le carbonate de magnésium, le monoxyde de plomb, le tétraoxyde de plomb ou l'oxyde de zinc;
- des colorants, tels que les oxydes d'antimoine, de cadmium, de cobalt, de fer, de nickel, de manganèse, de sélénium, de vanadium, d'uranium ou de titane;
- des opacifiants, tels que les oxydes d'antimoine, de titane, d'étain et de zirconium, ou d'antimoniate de sodium;
- des électrolytes, tels que le borax, la soude, le carbonate de magnésium, le sulfate de magnésium, le nitrite et l'aluminat de sodium;
- des liants, tels que l'argile, les gommes, l'alginate d'ammonium, la bentonite et la silice colloïdale.

Dans tous les types d'émaux et de glaçures, la première opération est la fabrication de la fritte. Elle comprend trois étapes : la préparation de la matière première, la fusion et le traitement de la fritte.

Après nettoyage soigneux des pièces métalliques (grenailage, décapage chimique, dégraissage), l'émail peut être appliqué selon divers procédés :

- dans le procédé par voie humide, la pièce est plongée dans un bain d'émail en suspension. Une fois extraite, elle subit un égouttage ou, si le bain est épais, un secouage;
- dans le procédé par voie sèche, l'émail est appliqué par saupoudrage. La pièce, d'abord recouverte d'une première couche, est

chauffée à la température d'émaillage, puis on la retire du four et on y applique la poudre d'émail sèche. La poudre cuit sur place et la pièce est ensuite remise au four où l'émail fond pour donner une surface lisse;

- la pulvérisation pneumatique, de plus en plus utilisée, s'accompagne normalement d'une mécanisation des travaux. Il faut disposer pour cela d'une cabine comportant un système de ventilation par aspiration;
- en décoration, l'émail est appliqué à la main, à l'aide d'un pinceau ou de divers autres instruments similaires;
- les glaçures servent aux poteries et aux porcelaines et le procédé d'application est généralement le trempage ou la pulvérisation. Dans le trempage, l'objet est tenu à la main et plongé dans une grande cuve contenant la glaçure; l'excédent est éliminé par un mouvement brusque du poignet, puis la pièce est mise à sécher à l'étuve. De nos jours, ce procédé est parfois mécanisé. Dans le cas de l'émaillage par pulvérisation, il y a lieu de prévoir l'emploi de hottes ou de cabines équipées d'un système d'aspiration efficace.

Après ces opérations, les objets sont cuits dans des fours généralement chauffés au gaz.

#### Le traitement à l'acide

Le traitement à l'acide permet d'obtenir un fini satiné ou mat. Il s'agit le plus souvent d'une phase préparatoire à l'anodisation, au laquage, aux traitements par conversion, au polissage ou au brillantage chimique. Le procédé est surtout appliqué à l'aluminium et à l'acier inoxydable, mais on l'utilise aussi avec de nombreux autres métaux.

L'aluminium est habituellement décapé dans des solutions alcalines contenant de l'hydroxyde de sodium, de l'hydroxyde de potassium, du phosphate trisodique et du carbonate de sodium, ou des combinaisons de ces différents corps auxquels on ajoute divers ingrédients destinés à empêcher la formation de dépôts boueux. L'un des procédés les plus courants fait appel à de l'hydroxyde de sodium à la concentration de 10 à 40 g/l maintenu à une température de 50 à 85 °C pour une durée d'immersion pouvant atteindre 10 minutes.

Le décapage en milieu alcalin est généralement précédé et suivi d'un traitement mettant en œuvre, seuls ou en combinaisons variées, les acides chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, chromique et sulfurique. Un traitement typique à l'acide fait appel à des immersions de 15 à 60 secondes dans un mélange composé de trois volumes d'acide nitrique pour un volume d'acide fluorhydrique. Le bain est maintenu à la température de 20 °C.

#### La galvanisation

La galvanisation, ou zingage, est l'opération qui consiste à recouvrir divers produits sidérurgiques d'une couche de zinc qui les protège de la corrosion. Pour que ce revêtement puisse adhérer au support, il faut que la surface du métal soit parfaitement propre et exempte de toute trace d'oxyde; c'est pourquoi elle est dégraissée, décapée, rincée, séchée et parfois recuite avant de passer dans le bain. Dans le cas de la galvanisation à chaud au trempé, le produit passe par un bain de zinc fondu; la galvanisation électrolytique, à froid, ou électrozingage, se ramène pour l'essentiel à l'électrodéposition déjà décrite.

Les produits manufacturés sont généralement galvanisés en discontinu, la méthode d'immersion continue étant réservée aux bandes d'acier, au feuillard ou au fil d'acier. On emploie parfois des flux pour éliminer les impuretés du bain de zingage et du produit à zinguer et pour faciliter le séchage. Après une application préliminaire de flux, on peut utiliser un bain de flux de chlorure d'ammonium à la surface du bain de zingage, ou passer directement à ce dernier. Dans le zingage des tuyaux, ceux-ci sont

plongés, après leur décapage et avant leur passage dans le bain, dans une solution très chaude de chlorure double de zinc et d'ammonium. La décomposition des flux entraîne la formation de chlorure d'hydrogène et d'ammoniac irritants exigeant la présence d'un système de ventilation avec aspiration localisée.

On distingue, selon le mode de nettoyage du produit et la possibilité de le nettoyer en cours d'opération, divers types de zingage par immersion:

- le nettoyage par oxydation à la flamme des huiles superficielles, suivi d'une réduction au four, le recuit se faisant en cours d'opération;
- le nettoyage électrolytique préalable au recuit effectué en cours d'opération;
- le décapage à l'acide et le dégraissage au solvant alcalin, avec application d'un flux et passage au four de préchauffage, suivis de recuit dans un four, et de galvanisation;
- le décapage à l'acide et le dégraissage dans un solvant alcalin, sans passage dans un flux et le préchauffage avant le zingage dans un gaz réducteur (hydrogène, par exemple).

Dans la succession des opérations du zingage en continu des tôles d'acier de faible épaisseur, on constate que les flux sont abandonnés. Le décapage est supprimé et le dégraissage se fait au solvant alcalin. Pour que la surface du métal reste propre, la tôle séjourne dans une chambre ou un four en atmosphère d'hydrogène réductrice, en attendant de passer dans le bain de zinc fondu.

La galvanisation en continu des fils métalliques exige un certain nombre d'opérations de recuit, le plus souvent dans une cuve contenant du plomb fondu en amont des cuves de dégraissage et de zingage. Suivent un refroidissement à l'air ou dans l'eau, un décapage dans l'acide chlorhydrique chaud dilué, un rinçage et le passage dans un flux. On termine par un passage au séchoir suivi de la galvanisation dans un bain de zinc fondu.

Au fond du bain se déposent des crasses de fer et de zinc mélangées qu'il faut enlever périodiquement. Pour prévenir une trop rapide oxydation du zinc à la surface du bain, celle-ci est généralement recouverte, sauf à l'entrée et à la sortie (qu'il faut souvent décrasser) de divers produits.

### Le traitement thermique

Le traitement thermique, qui joue un rôle souvent essentiel dans l'élaboration des métaux, peut être défini comme l'opération consistant à chauffer et à refroidir un métal à l'état solide. Cette opération s'accompagne à peu près toujours d'une modification de la structure cristalline du métal et, par voie de conséquence, d'une modification de ses propriétés (par exemple, recuit destiné à rendre le métal plus malléable, chauffage et refroidissement lent pour réduire la dureté du métal, chauffage et trempage pour en augmenter la dureté, chauffage à basse température pour limiter au minimum les tensions internes).

### Le recuit

Pour «adoucir» un métal, il est souvent nécessaire de lui faire subir un recuit qui lui permettra d'être ensuite travaillé à froid, améliorera son usinabilité, réduira ses contraintes avant la mise en service, etc. Ce traitement thermique consiste à chauffer le métal jusqu'à une température déterminée, à l'y maintenir pendant un temps également déterminé et à le refroidir à la vitesse désirée. Il existe de nombreuses techniques de recuit dont les plus typiques sont les suivantes:

- le *recuit bleu*, ou bleuissement, dans lequel une couche d'oxyde bleu se forme à la surface des alliages de fer;
- le *recuit brillant*, qui a lieu dans un four à atmosphère contrôlée pour réduire au minimum l'oxydation superficielle;

- le *recuit en caisses* ou *en pots*, dans lequel on chauffe les métaux ferreux et non ferreux sous enceinte métallique étanche, avec ou sans matériau d'emplissage, pour les refroidir ensuite lentement;
- le *recuit complet*, généralement effectué en atmosphère de protection, qui a pour but de réaliser l'adoucissement maximal compatible avec les impératifs économiques;
- la *malléabilisation*, recuit d'un type spécial, qui sert à rendre la fonte malléable par la transformation en carbone fin, c'est-à-dire en graphite, du carbone qu'elle contient;
- le *recuit partiel*, effectué à basse température et destiné à éliminer les contraintes d'écroutissage;
- le *recuit de coalescence*, qui donne une forme globulaire, ou sphéroïde, aux carbures de fer contenus dans la structure cristalline.

### La maturation à chaud

La maturation à chaud est un traitement thermique souvent appliqué aux cupro-aluminiums, dans lequel on accélère le durcissement naturel de l'alliage en chauffant autour de 180 °C pendant 1 heure environ.

### L'homogénéisation

Généralement utilisé pour les lingots ou les pièces frittées, ce traitement a pour but d'éliminer ou de réduire sensiblement la ségrégation. Il se fait par chauffage à une température inférieure d'environ 20 °C à la température de fusion. Après maintien isotherme d'une durée de deux heures, le métal est trempé.

### La normalisation

La normalisation est une opération analogue au recuit complet, qui permet d'assurer l'uniformité des caractéristiques mécaniques, ainsi qu'une plus grande ténacité et une meilleure résistance aux efforts mécaniques.

### Le patentage

Il s'agit d'un type particulier de recuit, habituellement appliqué aux matériaux de faible section destinés au tréfilage, par exemple aux fils d'acier à 0,6% de carbone. Le métal est chauffé dans un four ordinaire et porté à des températures supérieures au point de transformation; il est ensuite refroidi par passage direct depuis le four dans un bain de plomb, par exemple, maintenu à environ 170 °C.

### La trempe et le revenu

La dureté de certains alliages ferreux présentant des caractéristiques appropriées peut être augmentée si on les chauffe au-delà du point de transformation, pour les refroidir ensuite à la température ambiante à une vitesse suffisamment rapide (la trempe se fait généralement dans l'huile, dans l'eau ou à l'air). Etant donné la présence dans le métal de tensions internes trop importantes pour qu'il puisse être mis alors en service dans cet état, la trempe est suivie d'un revenu. Ce dernier traitement consiste ordinairement en un chauffage à une température inférieure au point de transformation, avec refroidissement réglé à une vitesse convenable.

La trempe étagée martensitique et la trempe bainitique sont des trempes similaires à la trempe normale, avec cette différence que le produit est refroidi, par exemple dans un bain de sels ou de plomb maintenu à une température de 400 °C.

### Les durcissements superficiels

Il s'agit là encore de traitements s'appliquant principalement aux alliages ferreux. Il est parfois intéressant de ne durcir que la couche superficielle d'une pièce métallique, en laissant au cœur une ductilité relative. On en compte plusieurs variantes:

- la *trempe au chalumeau*. Ce procédé permet de durcir, par exemple, la surface des dents d'engrenages, des paliers, les surfaces

de guidage, etc. en les chauffant avec une flamme de chalumeau à très haute température et en les refroidissant dans un milieu approprié, généralement dans de l'huile ou de l'eau;

- la *trempe après chauffage par induction*. Ce procédé est comparable à la trempe au chalumeau, à cela près que le chauffage est réalisé à l'aide de courants de Foucault induits dans les couches superficielles du métal;
- la *cémentation par le carbone*. Elle consiste à accroître la teneur en carbone de la couche périphérique d'un alliage ferreux en chauffant la pièce dans un milieu carboné qui peut être solide (charbon de bois, carbonate de baryum), liquide (cyanure de sodium, carbonate de sodium) ou gazeux (oxyde de carbone, méthane, etc.) à une température d'environ 900 °C;
- la *nitruration*. Grâce à ce procédé, on augmente la teneur en azote de la partie superficielle de certains aciers ou fontes spéciaux peu alliés en les chauffant dans un milieu azoté (habituellement du gaz ammoniac) à environ 500-600 °C;
- la *cyanuration*. Il s'agit d'une cémentation visant à enrichir simultanément en carbone et en azote la composition superficielle d'une pièce en acier à basse teneur en carbone. La méthode consiste habituellement à chauffer pendant 1 heure la pièce à 870 °C dans un bain à 30% de cyanure de sodium fondu, puis à la tremper dans de l'huile ou de l'eau;
- la *carbonituration*. Ce traitement est un procédé gazeux destiné à diffuser en même temps du carbone et de l'azote dans l'épaisseur superficielle d'un acier en chauffant la pièce à 800-875 °C dans un gaz carburant (voir ci-dessus) additionné d'un gaz nitrurant (par exemple, 2 à 5% d'ammoniac).

#### La métallisation par projection

La métallisation par projection est une technique de recouvrement métallique qui consiste à projeter en fines gouttelettes du métal fondu sur une surface préparée mécaniquement pour en augmenter la rugosité. Elle sert également à recharger des parties usées ou corrodées, ou encore à récupérer des pièces présentant des défauts d'usinage. Ce procédé est fréquemment désigné par les termes de «schoopage», ou métallisation schoop, du nom de son inventeur, Schoop.

Le matériel consiste en un pistolet à travers lequel le métal, sous forme de fil, est entraîné vers une flamme de chalumeau. La flamme du chalumeau, qui constitue la source de chaleur, est alimentée par un mélange oxygaz, le gaz combustible pouvant être de l'acétylène, du propane ou du gaz de ville comprimé. Le fil, enroulé sur bobine, passe à travers un dispositif de dressage avant de pénétrer dans le pistolet. Tous les métaux tréfilables se prêtent à la métallisation; on peut également utiliser dans le pistolet du métal sous forme pulvérulente.

Dans la métallisation sous vide, l'objet à revêtir est placé sous une cloche à vide, où a lieu la vaporisation du métal de revêtement.

#### La phosphatation

Ce traitement est surtout appliqué aux aciers doux et galvanisés ainsi qu'à l'aluminium et a pour rôle principal de faciliter l'accrochage des peintures et des finitions grasses ou cirées, tout en freinant la corrosion du métal. La phosphatation sert également à former une couche de séparation dans l'emboutissage profond des tôles métalliques, ainsi qu'à améliorer la résistance à l'usure des pièces frottantes. Le principe de base consiste à faire réagir la surface du métal avec une solution contenant un ou plusieurs phosphates de fer, de zinc, de manganèse, de sodium ou d'ammonium. Les bains de phosphates de sodium et d'ammonium servent aux traitements mixtes de nettoyage et de phosphatation. La nécessité de phosphater des pièces faites de plusieurs métaux et le désir d'augmenter la vitesse des fabrications lors des opérations automatisées ont amené à réduire les temps de réaction en ajoutant aux solutions phosphatant

des accélérateurs tels que fluorures, chlorates, molybdates et composés au nickel. Pour réduire la taille des cristaux et, par conséquent, assouplir les revêtements au phosphate de zinc, des agents tels que le phosphate tertiaire de zinc ou le phosphate de titane sont ajoutés au rinçage de prétraitement. L'opération de phosphatation comporte normalement les phases suivantes:

- un dégraissage caustique à chaud;
- un brossage et un rinçage;
- un nouveau dégraissage caustique à chaud;
- un rinçage à l'eau froide;
- une immersion dans un bain ou une aspersion avec une solution acide chaude de phosphates;
- un rinçage à l'eau froide;
- un rinçage à l'acide chromique à chaud;
- un nouveau rinçage à l'eau froide;
- un séchage.

#### Les peintures primaires

L'application de peintures primaires organiques sur des surfaces métalliques a pour but de faciliter l'accrochage des couches ultérieures de peinture et de retarder les phénomènes de corrosion qui se manifestent à l'interface peinture-métal. Les peintures primaires contiennent normalement des résines, des pigments et un solvant. Après préparation de la surface métallique, elles sont appliquées à la brosse, en brouillards, par immersion, au rouleau ou par électrophorèse.

Les solvants utilisés peuvent être des combinaisons quelconques d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, de cétones, d'esters, d'alcools et d'éthers. Les résines les plus communément employées sont le butyral polyvinylique, les résines phénoliques, les huiles siccatives à base d'alkydes, les huiles époxydisées, les époxyesters, les silicates d'éthyle et les caoutchoucs chlorés. Dans certaines peintures primaires complexes, on utilise comme agents durcisseurs des corps tels que la tétraéthylèpentamine, la pentaéthylènehexamine, les isocyanates et l'urée-formaldéhyde. Certains pigments métalliques entrent dans la composition des peintures primaires; les plus courants sont des composés du plomb, du baryum, du chrome, du zinc et du calcium.

#### Les revêtements de plastique

Les matières plastiques peuvent être appliquées en guise de revêtement sur les métaux sous forme liquide ou pulvérulente, ou en feuilles préfabriquées. Dans les deux premiers cas, le matériau revêtu sera ultérieurement durci ou cuit par chauffage. Quant à la feuille plastique, elle est appliquée sous pression sur la surface métallique, l'accrochage étant assuré par un agent adhésif. Les plastiques les plus couramment employés sont le polyéthylène, les polyamides (nylons) et le poly(acétate de vinyle). Ce dernier contient parfois des plastifiants à base d'esters monomères et polymères, ainsi que des stabilisants tels que le carbonate de plomb, des sels d'acides gras de baryum et de cadmium, du dilaurate de dibutylétain, des mercaptides alkylés et du phosphate de zinc. Bien qu'ils soient faiblement toxiques et non irritants, certains plastifiants se sont révélés être des agents de sensibilisation cutanée.

#### Les risques et leur prévention

Ainsi qu'on peut le déduire de la complexité des procédés décrits ci-dessus, les traitements de surface des métaux comportent des risques extrêmement divers, tant sur le plan de la sécurité que de la santé. Si beaucoup sont communs à toutes les opérations de fabrication, certains tiennent spécifiquement aux techniques et aux matériaux mis en œuvre. Enfin, plusieurs d'entre eux peuvent mettre en danger la vie même des travailleurs. Toutefois, d'une façon générale, ils peuvent être prévenus et maîtrisés.

### **L'aménagement des lieux de travail**

Les lieux de travail devraient être conçus de telle manière que l'acheminement des matières premières et des fournitures, d'une part, et l'enlèvement des produits finis, d'autre part, ne viennent pas gêner les fabrications en cours. Étant donné que plusieurs des produits chimiques utilisés sont inflammables, ou susceptibles de réagir lorsqu'ils sont mis en présence, il est indispensable de séparer les produits stockés des produits en transit. Bon nombre d'opérations de finition des métaux font appel à des liquides; en cas de fuites, d'épanchements ou d'éclaboussures de produits acides ou alcalins, ceux-ci doivent être épongés sans retard; les sols doivent donc être convenablement drainés et antidérapants. Les services d'entretien doivent veiller à ce que les ateliers et leurs abords soient propres et à ce qu'ils ne soient pas encombrés. Les systèmes d'évacuation des déchets solides et liquides et des effluents des fours ainsi que les dispositifs d'aspiration doivent être conçus dans le respect des règles de l'environnement.

Pour réduire autant que possible l'incidence des foulures, claquages, coups de fatigue et pathologies d'hypersollicitation, les postes de travail et les tâches devraient être organisés selon des principes ergonomiques. Les capots des machines doivent être dotés d'un verrouillage automatique, la machine devant s'arrêter immédiatement lorsqu'on retire le capot. Les carters de protection contre les éclaboussures sont indispensables. Compte tenu du danger que représentent les projections de solutions acides et alcalines à haute température, des fontaines oculaires et des douches d'urgence doivent être installées à proximité. Quant aux autres membres du personnel, qu'ils appartiennent à la production ou à l'entretien, ils devraient être prévenus par voie d'affichage des dangers que peuvent notamment présenter les bains chimiques et les surfaces chaudes.

### **L'évaluation des substances chimiques**

Toutes les substances chimiques devraient être évaluées en fonction de leur toxicité potentielle et des risques physiques qu'elles comportent; chaque fois que possible, on les remplacera par des matières moins dangereuses. Toutefois, étant donné que le produit moins toxique peut être plus inflammable, il y aura lieu de tenir compte également du risque d'incendie et d'explosion, sans négliger le problème de la compatibilité chimique des matériaux. C'est ainsi que si l'on mélange par accident des nitrates avec des sels de cyanure, on peut provoquer une explosion, en raison du fort pouvoir oxydant des nitrates.

### **Le système de ventilation**

La plupart des procédés de revêtement métallique exigent l'installation en un point stratégique d'un système de ventilation avec aspiration localisée destiné à mettre le travailleur à l'abri des vapeurs et d'autres contaminants. Certains systèmes font passer de l'air frais au-dessus des cuves de manière à refouler les contaminants vers la prise d'aspiration du dispositif. Les prises d'air frais doivent être placées à bonne distance des événements d'évacuation pour éviter toute recirculation de gaz potentiellement toxiques.

### **L'équipement de protection individuelle**

Les procédés de fabrication devraient être conçus de manière à empêcher les expositions potentiellement toxiques, mais comme il est impossible de parer totalement à ce genre de risque, les travailleurs doivent recevoir un équipement de protection individuelle approprié (lunettes spéciales avec ou sans écran facial, gants, tabliers ou combinaisons et chaussures). Comme bon nombre de ces expositions dangereuses concernent des solutions corrosives ou caustiques à haute température, ces équipements protecteurs devraient être thermiquement isolants et résistants aux substances chimiques. S'il y a un risque d'exposition au courant électrique, l'équipement devrait être en matériaux non conducteurs. Les équipe-

ments doivent exister en nombre suffisant pour que l'on puisse nettoyer et sécher les vêtements contaminés et humides avant de les réutiliser. Des gants isolants et autres vêtements protecteurs devraient être remis aux travailleurs s'il y a un risque de brûlures au contact du métal en fusion, des fours, etc.

Il y aura lieu aussi de mettre à la disposition des travailleurs des installations sanitaires comportant toilettes et douches, ainsi que des casiers et des vestiaires propres, afin que leurs effets personnels ne soient pas contaminés et qu'ils ne rapportent pas chez eux des matières toxiques.

### **La formation et l'encadrement du personnel**

Que ce soit à l'embauche ou en cas de modification des machines ou des procédés de fabrication, la formation et l'instruction du personnel sont essentielles. À chaque produit chimique correspondra un manuel expliquant les risques chimiques et physiques, la documentation étant rédigée dans une langue et dans un style qui puissent être bien compris. La vérification des compétences et la remise à niveau périodique permettront de s'assurer que les travailleurs ont bien assimilé l'information indispensable à leur sécurité. Un bon encadrement sera le meilleur moyen de vérifier que les procédures sont bien respectées.

### **Les risques particuliers**

Certains risques, propres à l'industrie du revêtement des surfaces métalliques, méritent d'être traités à part.

#### **Les solutions alcalines et acides**

Les solutions alcalines et acides portées à haute température que l'on utilise pour nettoyer et traiter les métaux sont particulièrement corrosives et caustiques. Elles sont irritantes pour la peau et les muqueuses et spécialement dangereuses si les yeux sont atteints par des éclaboussures. Des fontaines oculaires et des douches d'urgence sont indispensables. Des vêtements protecteurs appropriés et des lunettes spéciales devront assurer la protection contre les inévitables projections; si toutefois la peau devait être éclaboussée, la région contaminée devrait être immédiatement et abondamment rincée à l'eau propre et fraîche pendant 15 minutes au moins; il peut être nécessaire de faire appel à un médecin, surtout si l'œil est touché.

La prudence s'impose lors de l'utilisation d'hydrocarbures chlorés, car leur réaction avec des acides et des métaux peut provoquer un dégagement de phosgène. L'acide nitrique et l'acide fluorhydrique sont particulièrement dangereux en cas d'inhalation de leurs gaz; en effet, il peut s'écouler 4 heures et plus avant que les effets pulmonaires ne se fassent sentir. Il peut y avoir apparition tardive de bronchite, de pneumonie, voire d'œdème pulmonaire pouvant être mortel chez un travailleur apparemment sorti indemne de l'exposition. Une prophylaxie rapide et, bien souvent, l'hospitalisation des personnes ainsi exposées, sont à conseiller. Le contact cutané avec l'acide fluorhydrique peut provoquer de graves brûlures qui resteront indolores pendant plusieurs heures. Des soins médicaux doivent donc être dispensés d'urgence.

#### **Les poussières**

Les poussières de métaux et de leurs oxydes posent un problème particulier dans le cas des opérations de broyage et de polissage; le meilleur moyen de les éliminer est par l'emploi d'un système de ventilation avec aspiration localisée. Le réseau de distribution d'air devrait être à parois lisses et la vitesse de l'air suffisante pour empêcher les particules de s'échapper du courant d'air et de se déposer. Les poussières d'aluminium et de magnésium, qui peuvent être explosibles, devraient être recueillies dans un piège humide. Depuis qu'il est peu utilisé en céramique et dans les glaçures pour porcelaine, le plomb pose moins de problèmes qu'autrefois;

toutefois, ce métal reste un risque professionnel dont il faut se garder en toute circonstance. Le béryllium et ses composés ont retenu l'attention en raison de leur pouvoir cancérigène potentiel et des maladies chroniques dues à ce métal.

Certaines opérations présentent un risque de silicose et de pneumoconiose: c'est le cas de la calcination, du concassage et du séchage du silic, du quartz ou de la pierre; du tamisage, du mélange et de la pesée de ces substances à l'état sec et, enfin, du chargement des fours au moyen de ces matériaux. Ils constituent aussi un risque lorsqu'ils sont mis en œuvre dans un procédé par voie humide et qu'ils éclaboussent les lieux de travail et les vêtements des travailleurs pour retourner à l'état de poussière une fois secs. Une ventilation avec aspiration localisée, des règles de propreté et une hygiène individuelle rigoureuses sont autant de mesures préventives efficaces.

#### Les solvants organiques

Les solvants et autres produits chimiques organiques utilisés pour le dégraissage et dans certains procédés industriels sont dangereux s'ils sont inhalés. Dans la phase aiguë, les effets narcotiques peuvent conduire à l'arrêt respiratoire et à la mort. Dans le cas d'une exposition chronique, on observe surtout des troubles du système nerveux central et des altérations du foie et des reins. Une ventilation avec aspiration localisée suffit à créer une zone de sécurité d'au moins 80 à 100 cm entre la source et le périmètre de respiration du travailleur. Une ventilation doit également être installée sur l'établi pour éliminer les vapeurs résiduelles émanant des pièces terminées. L'effet de dégraissage de la peau causé par les solvants organiques peut être un précurseur de dermatites. De nombreux solvants sont en outre inflammables.

#### Le cyanure

Des bains contenant des cyanures sont fréquemment utilisés en dégraissage électrolytique, électrodéposition et cyanuration. En réagissant avec l'acide, ils formeront le cyanure d'hydrogène (acide prussique) volatil et potentiellement mortel. Dans l'air, la concentration mortelle est de 300 à 500 ppm. L'absorption cutanée ou par ingestion de cyanures peut également entraîner la mort. Les personnes travaillant avec le cyanure doivent impérativement observer une hygiène individuelle rigoureuse. Il ne devrait être pris aucun aliment avant de s'être lavé, et jamais sur les lieux de travail. Les mains et les vêtements doivent être soigneusement nettoyés après toute exposition potentielle au cyanure.

En cas d'intoxication au cyanure, les premiers secours consistent à transporter la victime à l'air libre, à la débarrasser des vêtements contaminés, à laver à grande eau les zones exposées, à mettre en place une oxygénothérapie et à lui faire inhaler du nitrite d'amyle. Au poste de travail, une ventilation avec aspiration localisée et un équipement de protection cutanée sont indispensables.

#### Le chrome et le nickel

Les composés du chrome et du nickel utilisés en galvanoplastie peuvent être dangereux. Les composés du chrome peuvent être responsables de brûlures, d'ulcération et d'eczéma de la peau et des muqueuses ainsi que de la perforation, très caractéristique, du septum nasal. L'asthme bronchique n'est pas rare. Les sels de nickel peuvent être cause d'affections cutanées rebelles à caractère allergique ou toxico-irritant. Il semblerait que les composés du chrome et du nickel puissent être cancérigènes. Là encore, une ventilation avec aspiration localisée et un équipement de protection cutanée sont indispensables.

#### Les fours et les étuves

Des précautions particulières s'imposent lors du travail près de fours servant, par exemple, au traitement thermique des métaux lorsque les composants sont manipulés à haute température et que

les matériaux mis en œuvre peuvent être toxiques, explosibles ou les deux à la fois. Les milieux gazeux (atmosphères) du four peuvent réagir en présence de la charge métallique (atmosphères oxydantes ou réductrices) ou être neutres et protecteurs. La plupart des atmosphères de protection contiennent jusqu'à 50% d'hydrogène et 20% de monoxyde de carbone. Combustibles, ces deux gaz forment en outre avec l'air des mélanges extrêmement explosibles aux températures élevées. La température d'inflammation varie entre 450 et 750 °C, mais même à des températures inférieures il suffit de la chaleur dégagée localement par une étincelle pour provoquer l'inflammation des gaz. Les risques d'explosion sont plus grands au démarrage ou à la fin de la période de fonctionnement. Les pannes d'énergie affectant la chauffe du four ou l'alimentation en gaz sont également dangereuses, car dans un four qui se refroidit l'air a tendance à s'infiltrer. C'est pourquoi il est sage d'avoir une réserve de gaz inerte (azote ou CO<sub>2</sub>) pour pouvoir purger l'installation en cas de panne. De même, il est prudent de purger avant d'introduire dans un four chaud les gaz constituant l'atmosphère protectrice.

Le plus grand danger que font courir les fours et les étuves est sans doute la présence de monoxyde de carbone. Étant donné que ce dernier est incolore et inodore, il atteint fréquemment des niveaux toxiques avant que la victime ait pris conscience du danger. Les maux de tête étant un des premiers signes d'intoxication, toute personne qui commence à en souffrir devrait rapidement respirer de l'air frais. Les zones dangereuses sont habituellement celles où l'air circule peu ou pas du tout, car la moindre fuite peut former des poches de gaz. On ne devrait pas oublier que la maçonnerie des fours, du fait qu'elle est poreuse, est susceptible de retenir une petite quantité de gaz au cours des opérations de purge, pour la restituer ensuite lentement.

Les fours à bain de plomb peuvent être dangereux étant donné que le plomb se volatilise très rapidement au-dessus de 370 °C. Un dispositif efficace d'extraction doit donc être installé au-dessus du four. La rupture ou une défectuosité du pot peuvent également constituer des dangers. Il est nécessaire de prévoir, pour l'un et l'autre cas, un puits ou une fosse de dimensions suffisantes pour recevoir le métal en fusion.

#### Les incendies et les explosions

Plusieurs des composés servant au revêtement des surfaces métalliques sont inflammables et, dans certaines conditions, explosibles. Les fours et les étuves fonctionnent généralement au gaz; des précautions particulières s'imposent par conséquent, telles que des brûleurs équipés de dispositifs de sécurité, des vannes de fermeture basse pression installées sur le circuit d'alimentation, des panneaux de rupture en cas de déflagration dans l'enceinte des fours, etc. Lors des opérations d'électrolyse, l'hydrogène dégagé au cours du procédé de fabrication peut s'accumuler à la surface du bain et, s'il n'est pas éliminé, il risque d'atteindre des concentrations explosives. Une ventilation adéquate des fours devrait être assurée, de même que l'on devrait protéger les brûleurs contre les risques d'obstruction par les gouttelettes de métal.

La trempe à l'huile comporte un risque important d'incendie, surtout si la pièce métallique n'a pas été complètement immergée. On devrait donc choisir des huiles ayant un point d'éclair suffisamment élevé; d'autre part, leur température ne devrait pas être portée au-delà de 27 °C.

Les bouteilles d'oxygène comprimé et de gaz utilisées pour la métallisation présentent un risque d'incendie et d'explosion si elles ne sont pas convenablement stockées et mises en œuvre (voir au présent chapitre l'article «Le soudage et le découpage thermique des métaux»).

Conformément à la réglementation nationale, du matériel de lutte contre l'incendie, y compris les systèmes d'alarme, devrait être disponible et maintenu en état de marche. Il conviendrait de

vérifier au moyen d'exercices que le personnel en connaît le fonctionnement.

#### La chaleur

L'utilisation de fours, d'appareils à flamme nue, d'étuves, de solutions chauffées et de métaux en fusion s'accompagne inévitablement d'un risque d'exposition à une chaleur excessive, surtout dans les climats chauds et humides et, plus encore, lorsque les travailleurs sont enfermés dans leurs vêtements et leur équipement de protection. S'il n'est pas toujours possible, du point de vue économique, d'envisager la climatisation complète d'une usine, on pourra à tout le moins distribuer localement de l'air frais au moyen de systèmes de ventilation. Des pauses dans des endroits frais et des boissons en quantités suffisantes (les liquides absorbés sur les lieux de travail devront être exempts de contaminants toxiques) permettront de se prémunir contre les effets nocifs de la chaleur. Les travailleurs et les agents de maîtrise devraient être formés à reconnaître les symptômes du coup de chaleur.

#### Conclusion

Le traitement de surface des métaux fait appel à de nombreux procédés dont chacun comporte un large éventail d'expositions potentiellement toxiques; dans la plupart des cas, on pourra les prévenir ou les limiter moyennant l'application rigoureuse de mesures de précaution à l'efficacité reconnue.

## ● LA RÉCUPÉRATION ET LE RECYCLAGE DES MÉTAUX NON FERREUX

*Melvin E. Cassady  
et Richard D. Ringenwald, Jr.*

Le recyclage des métaux non ferreux consiste à produire des métaux neufs à partir de rebuts, chutes et autres déchets métalliques. Ces métaux secondaires ne se distinguent en rien de ceux obtenus par élaboration primaire à partir de minerai. Cependant, les procédés mis en œuvre diffèrent légèrement et les expositions au risque peuvent donc être assez différentes. Quant aux moyens de prévention technique, ils sont sensiblement les mêmes. La récupération et le recyclage des métaux jouent un rôle très important dans l'économie mondiale en raison de la raréfaction des matières premières et du problème de la pollution de l'environnement par les déchets métalliques.

L'aluminium, le cuivre, le plomb et le zinc forment 95% de la production de l'industrie des métaux non ferreux secondaires. Mais l'on récupère aussi le magnésium, le mercure, le nickel, les métaux précieux, le cadmium, le sélénium, le cobalt, l'étain et le titane (le fer et l'acier sont traités au chapitre n° 73, «La sidérurgie», de l'*Encyclopédie*; voir aussi au présent chapitre l'article «La fusion et l'affinage du cuivre, du plomb et du zinc»).

#### Les stratégies de prévention

##### *Les principes de lutte contre les émissions et les expositions*

La récupération et le recyclage des métaux entraînent des expositions aux poussières, aux fumées, aux solvants, au bruit, à la chaleur, aux brouillards acides et à d'autres matières ou événements dangereux. On peut cependant, pour éliminer ou réduire les émissions, apporter certaines modifications aux procédés de fabrication ou à la manutention des matériaux: limitation des opérations de manipulation, abaissement des températures de cuve, diminution de la formation d'écumes et de crasses, réduction de la production superficielle de poussières et, enfin, modification du plan des installations de manière à réduire les manipulations de

matières dangereuses ou le réentraînement des poussières accumulées.

Dans certains cas, on peut limiter les expositions en choisissant de faire effectuer par des machines les tâches les plus dangereuses, ce qui permet de tenir les travailleurs à l'écart de la zone. C'est aussi un moyen de prévenir les risques ergonomiques liés à la manutention.

Pour empêcher la contamination des secteurs propres de l'usine, il est souhaitable d'isoler les procédés de fabrication qui produisent les émissions les plus importantes. Une barrière physique permettra de contenir les émissions et d'en limiter la propagation. De cette manière, le nombre des personnes exposées se trouvera diminué, de même que les sources d'émissions pouvant contribuer aux expositions dans un secteur donné. Cette manière de procéder simplifie les évaluations de l'exposition et facilite le repérage et le traitement des principales sources. C'est pour ces raisons que les opérations de récupération et de recyclage des métaux sont souvent séparées des autres processus industriels.

Il arrive que l'on puisse confiner ou isoler une source d'émissions spécifique. Toutefois, étant donné que les enceintes de confinement sont rarement étanches à l'air, on recourt fréquemment à un système d'aspiration qui les met en dépression. L'une des méthodes les plus utilisées pour lutter contre les dégagements consiste à installer des systèmes de ventilation avec aspiration localisée au point d'origine des émissions; ainsi captées à la source, ces émissions ne peuvent pas se disperser dans l'atmosphère. C'est également un moyen d'empêcher toute exposition secondaire des travailleurs par réentraînement des contaminants qui se sont déjà déposés.

La vitesse de captage de la hotte doit être suffisamment élevée pour que toutes les fumées et les poussières soient effectivement entraînées dans le flux d'air aspiré. La puissance de ce flux devra être suffisante pour entraîner particules de fumées et poussières dans la hotte, quelles que soient les perturbations créées par des courants d'air latéraux et autres mouvements aérauliques. La vitesse requise sera définie au cas par cas. L'emploi d'appareils de chauffage à recirculation d'air et de ventilateurs personnels qui pourraient contrarier le fonctionnement de l'aspiration localisée doit aussi être restreint.

Tous les systèmes de ventilation par aspiration ou dilution nécessitent un appoint d'air. Si le système de renouvellement de l'air est bien conçu et intégré dans les systèmes de ventilation naturels ou de confort, les travailleurs devraient être mieux protégés contre les expositions. On devrait installer, par exemple, les prises de renouvellement de l'air de manière que ce flux d'air neuf traverse la zone occupée par les travailleurs, qu'il se dirige ensuite vers la source d'émissions et, enfin, vers l'évacuation. Cette technique, souvent utilisée pour les îlots à alimentation en air frais, place le travailleur entre une arrivée d'air propre et la source d'émission.

Des mesures de réduction des émissions directes et une bonne gestion de l'atmosphère doivent permettre de préserver dans l'entreprise des zones propres se caractérisant par de faibles niveaux d'aérocontaminants. Par contre, les personnes obligées de travailler dans des zones contaminées seront protégées grâce à des cabines, des îlots, des postes de commande déportés et des salles de commande alimentés en air frais, ces mesures étant complétées le cas échéant par un appareil de protection respiratoire individuel.

Il est possible d'abaisser l'exposition quotidienne moyenne des travailleurs en réservant des zones propres telles que salles de repos et réfectoires alimentés en air frais filtré. Lorsqu'ils peuvent passer une partie de leur temps dans une zone relativement exempte de contaminants, les travailleurs sont soumis à une exposition moyenne pondérée moindre. Une autre application courante de ce principe est l'îlot à ventilation par air frais filtré où cet

air est directement injecté dans le périmètre de respiration de la personne à son poste de travail.

Des espaces suffisants devraient être prévus dans les locaux pour la pose de hottes, de conduits d'arrivée et d'évacuation d'air, pour l'installation de salles de commande et d'espaces destinés aux activités d'entretien, de nettoyage et au stockage du matériel.

Les véhicules sur roues sont des sources d'émissions secondaires non négligeables. Si l'on doit faire appel à ce mode de transport, on peut limiter les émissions en recouvrant toutes les surfaces d'un revêtement en dur, en veillant à empêcher les dépôts de poussières, en réduisant les parcours et la vitesse des véhicules et en modifiant la direction d'évacuation des gaz d'échappement et de refroidissement. Le choix du matériau, le béton par exemple, devrait dépendre de facteurs tels que la charge, l'utilisation et l'entretien des surfaces. Certaines surfaces peuvent recevoir un revêtement superficiel pour faciliter le lavage des chaussées au jet.

Tous les systèmes de ventilation par aspiration, par dilution ou par appoint d'air seront correctement entretenus en vue de lutter efficacement contre les contaminants atmosphériques. Outre la maintenance générale des systèmes de ventilation, on doit veiller à l'entretien de l'équipement de production pour éviter les épanchements accidentels de matières et les émissions dues à des fuites.

#### **La mise en œuvre du programme de bonnes pratiques de travail**

Les normes définissent les moyens techniques à mettre en œuvre pour satisfaire aux exigences, mais de bonnes pratiques de travail sont cruciales pour le succès du programme de prévention des risques. En effet, les mesures techniques peuvent rester inopérantes si les habitudes de travail, la maintenance, l'entretien ou l'hygiène individuelle laissent à désirer. Dans le cas du travail posté, par exemple, les travailleurs amenés à conduire les mêmes machines à des heures différentes risquent, par suite de disparités tenant aux facteurs que l'on vient d'exposer, de subir des expositions inégales aux contaminants contenus dans l'air ambiant.

Les programmes de bonnes pratiques de travail et une organisation rationnelle constituent un instrument de gestion relevant du bon sens; ils sont peu coûteux par rapport aux avantages qui en sont tirés, mais ils exigent une attitude de responsabilité et de coopération de la part des travailleurs et des agents de maîtrise. En fait, l'attitude de ces derniers ne fait souvent que refléter celle de la haute direction à l'égard des problèmes de sécurité et de santé. En conséquence, si l'encadrement ne s'attache pas à faire appliquer effectivement ces programmes, cela risque de se répercuter sur le comportement des travailleurs eux-mêmes. Les moyens d'encourager une attitude positive à l'égard des problèmes de sécurité et de santé peuvent être, par exemple:

- de susciter un climat de coopération dans lequel les travailleurs participent aux programmes;
- d'appliquer des programmes de formation théorique et pratique;
- de valoriser le programme de sécurité et de santé dans l'entreprise; la motivation et la confiance du personnel sont indispensables à l'efficacité du programme.

On ne peut pas se contenter de «mettre en place» des programmes de bonnes pratiques de travail. Exactement comme dans le cas d'un système de ventilation, on doit assurer leur maintenance et les contrôler en permanence pour vérifier qu'ils fonctionnent correctement. Ces programmes relèvent à la fois de la responsabilité de la direction et de celle des travailleurs. Ils devraient viser à enseigner, promouvoir et surveiller l'application de «bonnes» pratiques, c'est-à-dire celles qui permettent de limiter les expositions aux risques.

#### **Les équipements de protection individuelle**

Le port de lunettes de sécurité avec écrans latéraux, de combinaisons, de chaussures de sécurité et de gants de travail devrait être systématique, quelle que soit la tâche accomplie. Les fondeurs devraient porter en outre des tabliers et des gants ou mouffes en cuir ou autres matières appropriées pour se protéger contre les projections de métal en fusion.

Pour les opérations où les moyens de prévention technique ne permettent pas de réduire efficacement les émissions de poussières et de fumées, le port d'un appareil de protection respiratoire approprié s'impose. Si les niveaux sonores sont excessifs, et que l'on ne puisse pas y remédier par des moyens techniques ou en isolant les sources de bruit, le port d'un équipement de protection auditive devrait être imposé. On devrait compléter ces mesures par un programme de préservation de l'ouïe avec tests audiométriques et dispensation d'une formation aux travailleurs.

#### **Les procédés de fabrication**

##### **L'aluminium**

L'industrie de l'aluminium dit secondaire produit de l'aluminium métallique et des alliages d'aluminium à partir de déchets contenant des quantités variables de ce métal. Les procédés mis en œuvre comprennent le prétraitement des déchets, la refusion, l'alliage et le moulage. Parmi les matières premières utilisées par l'industrie de l'aluminium secondaire, on trouve des déchets, neufs ou anciens, de l'aluminium de liquation et une certaine quantité d'aluminium primaire. Les déchets neufs se composent de riblons, rebuts de coulées et autres chutes achetées à l'industrie aéronautique, aux usineurs et à d'autres entreprises industrielles. Les tournures sont des sous-produits de l'usinage des pièces moulées, des barres et des pièces forgées par l'industrie aéronautique et l'industrie automobile. Les crasses, écumes et laitiers de fonderie s'obtiennent auprès des entreprises de réduction électrolytique, des affineurs et des fonderies. Les déchets anciens sont constitués de pièces automobiles, d'articles ménagers et de pièces d'avion. Le recyclage comporte les étapes suivantes:

- *l'inspection et le triage.* Les déchets d'aluminium achetés sur le marché sont d'abord inspectés. Les déchets propres qui ne nécessitent aucun traitement préalable sont stockés ou chargés directement dans le four. L'aluminium qui requiert un traitement préalable est trié à la main. Le «blanc» (fer, acier inoxydable, zinc), le laiton et les objets de trop grandes dimensions sont retirés;
- *le broyage et le criblage.* Ce procédé s'applique aux déchets anciens et, notamment, aux pièces coulées et aux tôles contaminées par le fer. Une fois triés, les déchets sont dirigés vers un déchiqueteur ou un broyeur à marteaux où ils sont dilacérés et broyés; le fer est alors séparé de l'aluminium. Les déchets passent ensuite sur des cribles vibrants qui les débarrassent du stérile;
- *le paquetage.* Des presses spéciales permettent de compacter en paquets les déchets volumineux d'aluminium du type tombant de planche, déchets de fonderie et rognures;
- *le déchiquetage/classification.* Les câbles en aluminium pur, comportant une armature en acier ou des isolants, sont découpés au moyen de cisailles crocodiles, puis granulés ou fragmentés au broyeur à marteaux de manière à séparer de l'aluminium l'âme en fer et les gaines en plastique;
- *le brûlage/séchage.* Les tournures subissent un prétraitement destiné à éliminer les huiles de coupe, les graisses, l'humidité et le fer. Les déchets sont fragmentés dans un broyeur à marteaux ou à anneaux, puis l'humidité et les matières organiques sont volatilisées dans un sécheur rotatif à gaz ou à mazout; les tournures séchées sont ensuite tamisées pour éliminer les fines



d'aluminium, après quoi le matériau restant est défermé au séparateur magnétique. Enfin, les tournures propres et sèches sont envoyées dans des bacs de manutention;

- le *traitement des écumes chaudes*. On peut séparer l'aluminium des écumes chaudes provenant du four d'affinage grâce à un procédé de traitement par lot avec un flux composé d'un mélange de sel et de cryolithe. Ce procédé est mis en œuvre dans un tambour rotatif à garniture réfractaire. Un trou de coulée ménagé au point bas du tambour permet de soutirer périodiquement du métal;
- le *broyage à sec*. Avec ce procédé, des écumes froides et autres résidus chargés d'aluminium sont traités par broyage, criblage et densification, de manière à obtenir un produit contenant au minimum 60 à 70% d'aluminium. On peut utiliser des broyeurs à boulets, à barres ou à marteaux pour réduire en fine poudre les oxydes et les produits non métalliques. Le stérile est séparé du métal par tamisage, classification pneumatique ou tri magnétique;
- le *grillage*. Ce procédé sert à traiter les feuilles d'aluminium doublées de papier, de gutta-percha ou d'isolants. Au cours du grillage, les matières carbonées incluant les feuilles d'aluminium sont chargées dans un four pour récupérer le métal;
- la *fusion sélective de l'aluminium*. Il s'agit d'un procédé pyrometallurgique qui permet de récupérer de l'aluminium à partir de déchets à forte teneur en fer. Il est appliqué aux déchets de coupe, de fonderie et d'écumes d'aluminium à forte teneur en fer. On utilise généralement à cet effet des fours à réverbère à flamme nue et sole inclinée. L'aluminium et autres constituants à bas point de fusion s'écoulent le long de la sole et, après avoir traversé une grille, sont recueillis dans des lingotières refroidies par air, des poches de coulée ou de stockage. Le produit obtenu est appelé «aluminium de liquation». Les matières à point de fusion plus élevé, notamment le fer, le laiton et les produits d'oxydation formés au cours du processus, sont périodiquement soutirés;
- la *fusion-affinage (au chlore) au four à réverbère*. On se sert de fours à réverbère pour transformer en alliages titrés des déchets propres et triés, de l'aluminium de liquation ou, dans certains cas, des déchets bruts. Les déchets sont enfournés par des moyens mécaniques. On ajoute diverses matières selon que l'on traite par charges ou en continu. Après enfournement des déchets, on introduit un flux pour empêcher la masse en fusion d'entrer en contact avec l'air et donc de subir une oxydation (flux de protection). On ajoute des fondants qui, en réagissant avec les substances non métalliques telles que les résidus de revêtements de surface brûlés et les impuretés, forment des produits insolubles qui constituent un laitier flottant en surface. On ajoute ensuite divers éléments selon les spécifications de l'alliage à obtenir. La teneur en magnésium de la masse en fusion est abaissée par *bullage*. En cas d'affinage au chlore, le gaz est injecté par des cannes ou des lances en graphite dans le métal en fusion; le chlore contenu dans les bulles qui se forment réagit avec le magnésium et l'aluminium. L'écumage permet enfin de retirer de la surface du bain les flux semi-solides impurs;
- la *fusion-affinage (au fluor) au four à réverbère*. L'emploi de fluorure d'aluminium au lieu de chlore est la seule différence qui distingue ce procédé de celui décrit ci-dessus.

Le tableau 82.8 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage de l'aluminium ainsi que les moyens de prévention correspondants.

### La récupération et le recyclage du cuivre

L'industrie du cuivre dit secondaire produit du cuivre métallique et des alliages de cuivre à partir des déchets contenant du cuivre. Parmi les matières premières secondaires utilisées, on distingue les déchets neufs résultant de la fabrication de produits finis et le

cuivre ancien de récupération provenant d'objets en fin de vie comme les fils électriques, les accessoires utilisés en plomberie, le matériel électrique, les automobiles et les appareils ménagers. On peut aussi récupérer du cuivre dans les scories, les crasses, les cendres de fonderie et les débris trouvés chez les fondeurs. Le recyclage comporte les opérations suivantes:

- le *décorticage* et le *triage*. Les déchets sont triés en fonction de leur teneur en cuivre et de leur propreté. Les déchets propres peuvent être triés manuellement pour alimenter directement un four de fusion ou un four à creuset pour alliages. Les composants ferreux sont éliminés par séparateur magnétique. Les gaines isolantes et les blindages en plomb des câbles sont arrachés à la main ou au moyen de machines spéciales;
- le *briquetage* et le *compactage*. Pour faciliter la manutention, les fils métalliques, tôles minces, grilles, tournures et copeaux propres sont compactés au moyen de presses à balles hydrauliques, de broyeurs à marteaux et de broyeurs à boulets;
- le *grenailage*. La séparation du fil de cuivre de l'isolant s'effectue par réduction de la granulométrie des matières. Le matériau est ensuite trié par classification pneumatique ou hydraulique, puis défermé dans le séparateur magnétique;
- le *broyage* et le *tri par densité*. Ce procédé remplit le même rôle que le précédent, mais en mettant en œuvre une suspension aqueuse de différentes matières telles que laitiers, crasses, écumes, cendres de fonderie, scories et poussières de chambre de dépoussiérage;
- le *séchage*. Les impuretés organiques volatiles telles que liquides de coupe, huiles et graisses imprégnant les tournures et les copeaux sont éliminées;
- le *brûlage des isolants*. Ce procédé sépare les isolants et les autres revêtements des fils de cuivre en brûlant ces matériaux dans des fours. La charge de fils est introduite dans une première chambre de calcination ou de postcombustion. Les produits volatils de la combustion traversent ensuite une seconde chambre ou une chambre de filtration où ils sont recueillis. Il y a production de particules non spécifiques telles que fumées, argile ou oxydes métalliques. Les gaz et les vapeurs risquent de contenir des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, des chlorures, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des aldéhydes;
- la *liquation*. L'élimination des composants à bas point de vaporisation s'effectue en chauffant les déchets jusqu'à une certaine température, immédiatement supérieure au point de fusion des métaux à extraire. Le métal principal, le cuivre, n'est généralement pas le composant qui est fondu;
- la *lixiviation par solution ammoniacale carbonatée*. Le cuivre peut être récupéré à partir de déchets relativement propres par lixiviation et dissolution dans une solution basique de carbonate d'ammonium. Les ions cuivriques de la solution ammoniacale réagissent avec le cuivre métallique pour donner des ions cuivreux, lesquels peuvent être réoxydés à l'état cuivrique par oxydation de l'air. Une fois la solution séparée du résidu, l'oxyde de cuivre est récupéré par entraînement à la vapeur;
- la *distillation à la vapeur*. Par ébullition de la solution fournie par la lixiviation carbonatée, l'oxyde de cuivre est précipité, puis séché;
- la *réduction hydrothermique par l'hydrogène*. Une solution de carbonate d'ammonium contenant des ions de cuivre est chauffée sous pression dans l'hydrogène, ce qui précipite le cuivre sous forme de poudre. Celui-ci est filtré, lavé, séché et cuit sous atmosphère d'hydrogène. La poudre est ensuite broyée et tamisée;
- la *lixiviation à l'acide sulfurique*. De la mitraille et de la rognure de cuivre sont dissoutes dans de l'acide sulfurique chaud pour former une solution de sulfate de cuivre comme charge d'extraction électrolytique. Quand la dissolution est terminée, les résidus insolubles sont éliminés par filtration;

Tableau 82.8 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage de l'aluminium, par opération

| Opération                                       | Exposition  | Mesures techniques/administratives  |
|---|---|---|
| Inspection et triage des déchets                | Dessoudage au chalumeau — fumées métalliques telles que le plomb et le cadmium  | Ventilation avec aspiration localisée lors du dessoudage; équipement de protection individuelle — protection respiratoire lors du dessoudage  |
| Broyage/criblage                                | Poussières et aérosols non spécifiques, brouillards d'huile, particules métalliques et bruit  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe   |
| Paquetage                                       | Pas d'exposition connue   | Pas de mesures de prévention  |
| Brûlage/séchage                                 | Particules non spécifiques dont, le cas échéant, des métaux, de la suie et des matières organiques lourdes concentrées. Gaz et vapeurs contenant des fluorures, du dioxyde de soufre, des chlorures, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des aldéhydes | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe                            |
| Traitement des écumes chaudes                   | Dégagement de fumées  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale   |
| Broyage à sec                                   | Poussières  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale   |
| Grillage  | Poussières  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe                            |
| Fusion sélective                                | Fumées et particules métalliques, gaz et vapeurs non spécifiques, chaleur et bruit  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire |
| Fusion-affinage (au chlore) au four à réverbère | Produits de combustion, chlore, chlorures d'hydrogène, chlorures métalliques, chlorures d'aluminium, chaleur et bruit   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire |
| Fusion-affinage (au fluor) au four à réverbère  | Produits de combustion, fluor, fluorures d'hydrogène, fluorures métalliques, fluorures d'aluminium, chaleur et bruit  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire |

- la *fusion au convertisseur*. La matte liquide ou cuivre noir subit une conversion dans un convertisseur à virole en acier en forme de cornue ou de cylindre, à garnissage de briques réfractaires. Par des tuyères, on insuffle de l'air à la surface de la matte. L'air oxyde le sulfure de cuivre et les autres métaux. On ajoute un fondant contenant de la silice qui réagit avec les oxydes de fer pour former un laitier de silicate de fer. Ce laitier est évacué, généralement par basculement du convertisseur, après quoi l'on procède à une nouvelle insufflation d'air suivie d'un écrémage. Le cuivre brut obtenu est du cuivre blister qui est généralement affiné au feu dans un four;
- l'*affinage thermique*. Le cuivre brut du convertisseur est affiné au feu dans un four cylindrique oscillant, assez semblable à un four réverbère. Le cuivre blister est chargé dans la cuve dans une atmosphère oxydante. Les impuretés sont écrémées en surface avec le laitier et la charge liquide est désoxydée par le «perchage», opération qui consiste à plonger dans le bain de cuivre des perches de bois vert. Le perchage peut être remplacé par l'insufflation de gaz naturel. Le métal en fusion est ensuite coulé. S'il est destiné à subir un raffinage électrolytique, le cuivre est coulé en forme d'anode;
- l'*affinage électrolytique*. Les anodes solubles en cuivre affiné au feu sont placées dans une cuve contenant un bain d'acide sulfurique traversé par un courant continu. Le cuivre de l'anode est ionisé et les ions cuivre se déposent sur des feuilles de départ de cuivre pur. Tandis que les anodes se dissolvent dans l'électrolyte, les impuretés se déposent sous forme de boues au fond de la cuve. Ces boues peuvent être traitées à leur tour afin de récupérer les

métaux intéressants qu'elles contiennent. Le cuivre produit à la cathode est fondu et moulé sous des formes diverses.

Le tableau 82.9 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du cuivre ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du plomb

Les affineurs peuvent être amenés à devoir faire subir un traitement aux matières premières secondaires qu'ils reçoivent avant la fusion proprement dite. Dans cette partie, on traitera des matières qui sont les plus couramment achetées par les affineurs ainsi que des mesures de prévention technique et des pratiques d'atelier qui permettent de réduire au minimum les risques d'exposition au plomb liés au traitement de celles-ci. Il convient de noter que les poussières de plomb sont omniprésentes dans les ateliers de récupération et de recyclage de ce métal et que toute circulation d'air est susceptible de soulever ces poussières qui peuvent alors être inhalées, ou adhérer aux chaussures, aux vêtements, à la peau et aux cheveux.

#### Les batteries d'accumulateurs automobiles

Ce sont les batteries d'accumulateurs réformées qui constituent l'essentiel de la matière première secondaire des affineurs. Environ 50% du poids d'une batterie peuvent être recyclés sous forme de plomb métallique au cours du processus de fusion et d'affinage. Environ 90% des batteries automobiles actuellement fabriquées comportent un bac en polypropylène. Ces bacs sont récupérés par la quasi-totalité des affineurs en raison de la valeur économique

Tableau 82.9 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du cuivre, par opération

| Opération                                       | Exposition   | Mesures techniques/ administratives   |
|---|--|---|
| Décorticage et triage des déchets               | Polluants de l'air libérés par la manutention, le dessoudage ou le découpage des déchets   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale   |
| Briquetage et compactage                        | Poussières et aérosols non spécifiques, brouillards d'huile, particules métalliques et bruit   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire  |
| Déchiquetage                                    | Poussières non spécifiques, isolants de fils électriques, particules métalliques et bruit  | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire  |
| Broyage et tri par densité                      | Poussières non spécifiques, particules métalliques provenant des fondants, scories et crasses; bruit   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire  |
| Séchage   | Particules non spécifiques pouvant inclure des métaux, de la suie et des matières organiques lourdes condensées<br>Gaz et vapeurs contenant des fluorures, du dioxyde de soufre, des chlorures, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des aldéhydes | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire |
| Brûlage des isolants                            | Particules non spécifiques pouvant inclure des fumées, de l'argile et des oxydes métalliques<br>Gaz et vapeurs contenant des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, des chlorures, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des aldéhydes               | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                         |
| Liquation                                       | Fumées et particules métalliques, gaz, vapeurs et particules non spécifiques   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire |
| Lixiviation par solution ammoniacale carbonatée | Ammoniac   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection respiratoire  |
| Distillation à la vapeur                        | Ammoniac   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — lunettes avec écrans latéraux  |
| Réduction hydrothermique par l'hydrogène        | Ammoniac   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection respiratoire  |
| Lixiviation à l'acide sulfurique                | Brouillards d'acide sulfurique   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale   |
| Fusion au convertisseur                         | Métaux volatils, bruit   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire  |
| Fusion au creuset électrique                    | Particules, oxydes de soufre et d'azote, suie, monoxyde de carbone, bruit  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe   |
| Affinage thermique                              | Oxydes de soufre, hydrocarbures, particules  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe   |
| Affinage électrolytique                         | Acide sulfurique et métaux contenus dans les boues   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale   |

du polypropylène. La plupart des procédés mis en œuvre donnent lieu à des émissions de fumées métalliques, surtout de plomb et d'antimoine.

Lors de la *casse des batteries d'accumulateurs automobiles*, il y a risque de formation d'arsenic ou de stibine, à cause de la présence d'arsenic et d'antimoine utilisés comme durcisseurs dans les grilles de plaques, et également risque d'émissions d'hydrogène naissant.

La casse des batteries d'accumulateurs automobiles fait surtout appel aux quatre procédés ci-après:

1. le sciage rapide;
2. le sciage lent;

3. le cisaillage;
4. le broyage de la batterie entière (déchiqueteur, broyeur à marteaux, etc.).

Dans les trois premières de ces opérations, on procède en découpant le couvercle de la batterie pour en extraire les plaques ou matériaux contenant du plomb. La quatrième opération consiste à broyer toute la batterie dans un broyeur à marteaux, puis à séparer les différents composants par gravité.

La *séparation des composants de batteries d'accumulateurs automobiles* implique d'abord la casse afin de pouvoir séparer du bac les matériaux contenant le plomb. Cette opération peut produire des émissions de brouillards acides. On a recours à plusieurs techniques dont les principales sont les suivantes:

- la technique *manuelle*. C'est celle employée par la grande majorité des affineurs et qui reste la plus courante dans les petites et moyennes entreprises. Après le sciage ou le cisaillage des batteries, un travailleur vide manuellement les plaques ou matériaux contenant du plomb en tas et dépose le bac et le couvercle de la batterie sur un autre tas ou sur un système de transport;
- le dispositif à *tambour*. Après le sciage ou le cisaillage de la partie supérieure, les batteries sont chargées dans un tambour pour séparer les plaques des bacs. Pendant que le tambour tourne lentement, les nervures de sa paroi intérieure éjectent hors des bacs les plaques qui tombent à travers les fentes de celui-ci; les bacs sont transportés jusqu'à l'extrémité du dispositif et recueillis à la sortie. Les bacs et les couvercles de batterie en plastique et en caoutchouc subissent un nouveau traitement après avoir été séparés des matériaux contenant du plomb;
- la *flottation gravimétrique*. La casse des batteries par broyeur à marteaux est fréquemment combinée à la flottation gravimétrique. Les morceaux de batteries, qu'il s'agisse des bacs ou des éléments contenant du plomb, sont placés dans une série de cuves remplies d'eau. Les matériaux renfermant du plomb tombent au fond des cuves et sont évacués par transporteur à vis ou entraîneur à chaîne tandis que les matériaux des bacs remontent à la surface où ils sont recueillis par écumage.

La plupart des affineurs rachètent aussi périodiquement des batteries industrielles ayant servi à alimenter des équipements électriques mobiles ou d'autres machines. Souvent, ces batteries comportent des bacs en acier qu'il faut découper au chalumeau ou à la scie à moteur à essence tenue à la main.

#### Autres déchets contenant du plomb

Les affineurs achètent divers autres déchets qui leur serviront de matière première secondaire pour la fusion: des rebuts des usines de fabrication de batteries, des crasses de plomb d'affinage, du plomb d'imprimerie ancien, des gaines de câbles, ainsi que des résidus de tétraéthylplomb. Ces différents matériaux peuvent être chargés directement dans les fours de fusion ou mélangés à d'autres charges.

#### La manutention et le transport des matières à recycler

La manutention, le transport et le stockage des matières à recycler représentent un élément essentiel du procédé de seconde fusion du plomb. Ces matières sont transportées par chariots élévateurs à fourche ou à benne frontale, ou par des transporteurs mécaniques (à vis, à godets ou à bande). La principale méthode employée pour le transport des matériaux dans l'industrie de seconde fusion est l'équipement mobile.

Parmi les modes de transport mécanique les plus couramment utilisés par les affineurs, on peut citer: les convoyeurs à bande qui amènent les charges du parc de matières premières jusqu'au four; les transporteurs à vis qui évacuent les poussières de gueulard collectées dans le dépoussiéreur jusqu'à un four à fritter ou à une aire de stockage; ou encore les transporteurs à godets et les entraîneurs à chaîne.

#### La fusion

Chez les affineurs, la seconde fusion consiste à obtenir du plomb métallique à partir de déchets contenant du plomb au moyen d'une réduction conduite dans un haut-fourneau ou un four à réverbère.

On charge dans le haut-fourneau les matériaux contenant du plomb ainsi que du coke (combustible), de la chaux et du fer (fondants). Ces charges sont introduites par le gueulard, à la partie supérieure de la cuve, ou par une porte ménagée latéralement dans la cuve, non loin du gueulard. Parmi les risques pour l'environnement qu'engendre le fonctionnement des hauts-fourneaux,

il faut citer les fumées métalliques et les particules (de plomb et d'antimoine, notamment), la chaleur, le bruit et le monoxyde de carbone. La seconde fusion du plomb suppose l'emploi de divers appareils pour transporter les charges. Le skip semble le plus répandu. On utilise aussi des trémies vibrantes, des transporteurs à bande et des élévateurs à godets.

Les opérations de coulée consistent à soutirer de la cuve le plomb et le laitier en fusion pour le recueillir dans des moules ou dans des poches. Certains fondeurs recueillent directement dans une poche de maintien en température le métal en fusion destiné à l'affinage. Les autres le coulent en gueuses qu'ils laissent refroidir.

L'air nécessaire à la combustion pénètre dans la cuve par des tuyères qui ont parfois tendance à s'obstruer et qui doivent être maintenues dégagées des scories au moyen d'une barre à mine. Pour ce faire, on enlève les couvercles pour insérer la barre, puis on les remet en place après débouchage des tuyères.

Les fours à réverbère sont alimentés en matériaux contenant du plomb au moyen d'un mécanisme de chargement. Dans l'industrie de seconde fusion du plomb, les fours à réverbère comportent généralement une voûte en arc-boutant ou suspendue en briques réfractaires. La plupart des polluants et des risques physiques inhérents au fonctionnement des fours à réverbère sont les mêmes que pour les hauts-fourneaux. Les équipements dangereux sont similaires à ceux décrits pour les hauts-fourneaux: refouleur hydraulique, transporteur à vis, etc.

Quant aux opérations de coulée avec les fours à réverbère, elles sont, là encore, très similaires à celles des hauts-fourneaux.

#### L'affinage

Dans les installations de seconde fusion du plomb, l'affinage est effectué dans des cuves ou poches à chauffage indirect. Le métal provenant des fours de fusion est généralement refondu dans la cuve; on ajuste alors la teneur en éléments d'alliage pour obtenir le titre souhaité. Les produits les plus courants sont le plomb doux marchand et divers alliages de plomb durs antimonisés.

Pour la plupart des opérations d'affinage du plomb de seconde fusion, on a recours à des méthodes manuelles pour ajouter des éléments d'alliages et pour retirer les crasses qui sont ramenées vers le bord de la cuve, puis enlevées avec une pelle ou une louche et versées dans un récipient à crasses.

Le tableau 82.10 spécifie les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du plomb, ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du zinc

L'industrie de seconde fusion du zinc utilise comme matières premières secondaires des chutes de fabrication, des produits d'écumage et des cendres, des écumes de coulée sous pression, des crasses de galvaniseurs, des poussières de gueulard et des résidus chimiques. La plupart des déchets neufs ainsi transformés sont des alliages de zinc et de cuivre provenant des opérations de galvanisation et de moulage sous pression. Le zinc ancien comprend les vieilles plaques pour gravure, les pièces coulées de rebut et les ferrailles de zinc en barres. Les procédés de recyclage sont les suivants:

- la *liqutation au four à réverbère*. Les fours de liqutation servent à séparer le zinc des autres métaux sous température contrôlée. De vieilles pièces moulées (grilles de calandre, plaques d'immatriculation d'automobiles, croûtes de moulage ou résidus) servent de matériaux de démarrage. On charge les ferrailles de zinc dans le four, puis on ajoute un fondant et on commence la fusion. Les résidus à haut point de fusion sont enlevés et le zinc fondu qui s'écoule est directement acheminé vers des opérations telles que la refusion, l'affinage ou l'alliage, ou dans des

Tableau 82.10 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du plomb, par opération

| Opération               | Expositions  | Mesures techniques/administratives   |
|-------------------------|--|--|
| Véhicules               | Poussières de plomb déposées sur les routes et éclaboussures d'eau contenant du plomb      | Lavage à grande eau des sols, qui doivent être humidifiés. Pour la conduite de tout équipement mobile: formation des conducteurs, pratiques de travail de sécurité et bonne organisation sont des moyens essentiels pour réduire au minimum les émissions de plomb. Les équipements seront confinés dans des enceintes et on prévoira un système d'apport d'air filtré à pression positive |
| Transporteurs           | Poussières de plomb  | Il est préférable d'équiper les transporteurs à bandes de poulies de renvoi autonettoyantes ou de raclettes s'ils servent à transporter des charges ou des poussières de carneau vers le four  |
| Démontage des batteries | Poussières de plomb, brouillards acides  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Préparation des charges | Poussières de plomb  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Hauts-fourneaux         | Fumées et particules métalliques (plomb, antimoine), chaleur et bruit, monoxyde de carbone | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection respiratoire et protection de l'ouïe  |
| Fours à réverbère       | Fumées et particules métalliques (plomb, antimoine), chaleur et bruit                      | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides, isolation des sources de bruit; équipement de protection individuelle — protection respiratoire et protection de l'ouïe  |
| Affinage                | Particules de plomb et, éventuellement, de métaux d'alliage et de fondants, bruit          | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe  |
| Coulée                  | Particules de plomb et, éventuellement, de métaux d'alliage                                | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |

poches d'attente. Les principaux contaminants métalliques à ce stade sont l'aluminium, le cuivre, le fer, le plomb, le cadmium, le manganèse et le chrome, plus les fondants, les oxydes de soufre, les chlorures et les fluorures;

- la *liquéfaction au four rotatif*. Dans ce procédé, les ferrailles de zinc, les pièces moulées sous pression, les résidus et les crasses de fusion sont chargés dans un four à chauffage direct. On écume le bain et le zinc métal est recueilli dans des creusets situés à l'extérieur du four. Les scories infusibles sont enlevées avant le rechargement. Le métal subit ensuite des opérations de distillation ou d'alliage. Les contaminants sont les mêmes que ceux rencontrés dans la liquation au four réverbère;
- la *liquéfaction au four à moufle et en cuve*. Dans ces procédés, les ferrailles de zinc, les pièces moulées sous pression, les résidus et les crasses de fusion sont chargés dans un four à moufle. Les matières extraites et le zinc de liquation sont ensuite acheminés vers l'affinage ou les opérations d'alliage. Le résidu est enlevé au moyen d'un crible vibrant qui sépare l'écume du laitier. Les contaminants sont semblables à ceux rencontrés dans la liquation au four réverbère;
- le *broyage/criblage*. Les résidus de zinc sont pulvérisés ou broyés pour dissocier physiquement le zinc métallique des fondants à enlever. Le broyat est ensuite trié par criblage ou triage pneumatique. Les risques lors du broyage sont les émissions d'oxyde de zinc et de petites quantités de métaux lourds et de chlorures;
- la *lixiviation au carbonate de sodium*. Les résidus sont soumis à une lixiviation chimique pour transformer le zinc en oxyde de zinc. Les ferrailles de zinc sont d'abord broyées, lavées, puis traitées par lixiviation. La solution aqueuse est traitée au carbonate de sodium pour précipiter le zinc qui est ensuite séché et calciné pour obtenir de l'oxyde de zinc brut. Cet oxyde est enfin réduit en zinc métal. Ces opérations peuvent produire diverses émissions de contaminants dont des sels de zinc;
- la *fusion au four à moufle, à creuset, au four à réverbère, au four à induction*. On charge le four en ferrailles de zinc et l'on ajoute

des fondants. Le bain est agité pour favoriser la formation de crasses que l'on peut recueillir sous forme d'écumes à la surface. Après écumage, le zinc métallique est coulé dans des poches ou des moules. Il existe à ce stade un risque de dégagement de vapeurs d'oxyde de zinc, d'ammoniac et de chlorure d'ammonium, de gaz chlorhydrique et de chlorure de zinc;

- l'*alliage*. Le but de cette opération est de produire des alliages de zinc à partir de zinc métal de deuxième fusion par addition dans une cuve d'affinage de fondants et d'éléments d'alliages soit sous forme solidifiée, soit en fusion. Après mélange du contenu et écumage, le métal est coulé dans des moules de diverses formes. Il existe un risque d'exposition à des particules contenant du zinc, ou à des métaux d'alliage, des chlorures, des gaz et des vapeurs non spécifiques ainsi qu'à la chaleur;
- la *distillation au four à moufle*. C'est le procédé employé pour récupérer le zinc à partir d'alliages de zinc et fabriquer des lingots de métal pur. Il s'agit d'un procédé semi-continu qui consiste à charger le zinc en fusion provenant d'un four à creuset ou d'un four de liquation dans un four à moufle. Le zinc vaporisé est envoyé dans un condenseur d'où le zinc liquide est soutiré pour être coulé dans des moules. Les scories restantes sont extraites périodiquement du four;
- la *distillation/oxydation en cornue ou au four à moufle*. Dans les deux cas, le produit obtenu est l'oxyde de zinc. Ce procédé est semblable à la distillation en cornue jusqu'à la phase de vaporisation, mais il ne comporte pas de condenseur et utilise une injection d'air de combustion. Les vapeurs sont évacuées à travers un orifice dans un flux d'air. Il y a combustion spontanée dans une chambre réfractaire. Le produit est entraîné par les gaz de combustion et l'air en excès vers un dépoussiéreur où il est recueilli. L'excès d'air sert à assurer une oxydation complète et à refroidir le produit. Chacun de ces procédés de distillation peut être une cause d'expositions à des vapeurs d'oxyde de zinc, ainsi qu'à d'autres particules métalliques et à des oxydes de soufre.

Tableau 82.11 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du zinc, par opération

| Opération   | Exposition   | Mesures techniques/administratives   |
|---|--|--|
| Liquation au four à réverbère   | Particules contenant du zinc, de l'aluminium, du cuivre, du fer, du plomb, du cadmium, du manganèse et du chrome, des contaminants provenant de fondants, des oxydes de soufre, des chlorures et des fluorures | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Liquation au four rotatif   | Particules contenant du zinc, de l'aluminium, du cuivre, du fer, du plomb, du cadmium, du manganèse et du chrome, des contaminants provenant de fondants, des oxydes de soufre, des chlorures et des fluorures | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Liquation au four à moufle et en cuve   | Particules contenant du zinc, de l'aluminium, du cuivre, du fer, du plomb, du cadmium, du manganèse et du chrome, des contaminants provenant de fondants, des oxydes de soufre, des chlorures et des fluorures | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Broyage/criblage  | Oxyde de zinc, petites quantités de métaux lourds, chlorures   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Lixiviation au carbonate de sodium  | Oxyde de zinc, carbonate de sodium, carbonate de zinc, hydroxyde de zinc, chlorure d'hydrogène, chlorure de zinc   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Fusion au creuset, au four à réverbère ou par induction électrique                        | Fumées d'oxyde de zinc, ammoniac, chlorure d'ammoniac, chlorure d'hydrogène, chlorure de zinc  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Alliage   | Particules contenant du zinc, des métaux d'alliage, des chlorures; gaz et vapeurs non spécifiques; chaleur   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Distillation en cornue, distillation/oxydation en cornue et distillation au four à moufle | Fumées d'oxyde de zinc, autres particules métalliques, oxydes de soufre  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |
| Distillation par résistance en graphite   | Fumées d'oxyde de zinc, autres particules métalliques, oxydes de soufre  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |

Le tableau 82.11 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du zinc ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du magnésium

Les sources de ferrailles de magnésium sont les pièces d'automobiles et d'avions envoyés à la casse, les vieilles plaques lithographiques ainsi que des boues provenant de la première fusion du magnésium. Les déchets de production sont des chutes, tournures, produits d'écumage, scories, crasses et rebuts de laminoirs et d'ateliers de fabrication. Le plus grand risque lié au magnésium est l'incendie; il suffit en effet d'une étincelle, d'une flamme, pour enflammer les petits fragments de métal. La récupération et le recyclage du métal comportent les étapes ci-après:

- le *triage manuel*. Il permet de séparer le magnésium et les alliages de magnésium des autres métaux présents dans les déchets. Ceux-ci sont étalés à la main et triés en fonction de leur poids;
- la *fusion en cuve ouverte*. Ce procédé sert à séparer le magnésium des contaminants contenus dans les déchets préalablement triés. Les déchets sont chargés dans un creuset, puis chauffés avant adjonction d'un fondant composé d'un mélange de chlorures de calcium, de sodium et de potassium. Le magnésium fondu est ensuite coulé en lingots.

Le tableau 82.12 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du magnésium ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du mercure

Le mercure est principalement récupéré à partir d'amalgames dentaires, de piles au mercure usagées, de boues en provenance

des procédés électrolytiques qui utilisent le mercure comme catalyseur, de mercure d'anciennes usines de chlore et de soude caustique et d'instruments contenant du mercure. Des vapeurs de mercure peuvent être émises dans chacun des procédés ci-après:

- le *broyage*. Ce procédé permet de libérer le mercure restant contenu dans des récipients en métal, en plastique ou en verre. Après broyage des récipients, le mercure liquide contaminé est envoyé à la filtration;
- la *filtration*. On retire les impuretés insolubles en faisant passer les déchets contenant des vapeurs de mercure à travers un filtre. Le filtrat est dirigé vers l'oxygénation, tandis que les

Tableau 82.12 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du magnésium, par opération

| Opération                 | Expositions  | Mesures techniques/administratives   |
|---------------------------|--|--|
| Triage manuel des déchets | Poussières   | Lavage à grande eau  |
| Fusion en cuve ouverte    | Fumées et poussières, risque important d'incendie            | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; bonnes pratiques de travail                       |
| Coulée                    | Poussières et fumées, chaleur et risque important d'incendie | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides |

Tableau 82.13 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du mercure, par opération

| Opération                | Expositions   | Mesures techniques/administratives   |
|--------------------------|---|--|
| Broyage                  | Vapeurs de mercure  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                       |
| Filtration               | Vapeurs de mercure  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                       |
| Distillation sous vide   | Vapeurs de mercure  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                       |
| Purification en solution | Vapeurs de mercure, solvants, matières organiques et brouillards acides | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection respiratoire |
| Oxydation                | Vapeurs de mercure  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                       |
| Distillation en cornue   | Vapeurs de mercure  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire                       |

matières solides arrêtées par les filtres sont envoyées à la distillation en cornue;

- la *distillation sous vide*. On a recours à la distillation sous vide pour raffiner le mercure contaminé lorsque les pressions de vapeur des impuretés à éliminer sont nettement inférieures à celle du mercure. La charge de mercure est d'abord vaporisée par chauffage dans un creuset et la vapeur est recueillie dans un condenseur refroidi par eau. Le mercure ainsi purifié est collecté et flaconné. Les résidus restant dans le creuset sont envoyés vers une distillation en cornue pour récupérer les traces de mercure que la distillation sous vide n'avait pas permis d'extraire;
- la *purification en solution*. Elle permet d'éliminer les contaminants métalliques et organiques par lixiviation du mercure liquide brut par un acide dilué. Les différentes phases de l'opération sont les suivantes: lixiviation du mercure liquide brut à l'acide nitrique étendu pour séparer les impuretés métalliques; agitation à l'air comprimé du mélange mercure-acide pour faciliter le brassage; séparation du mercure de l'acide par décantation; lavage à l'eau pour éliminer l'acide résiduel; et filtrage du mercure à travers un milieu tel que charbon actif ou gel de silice pour enlever les dernières traces d'humidité. Les opérateurs risquent d'être exposés non seulement aux vapeurs de mercure, mais aussi à des solvants, des substances chimiques organiques et des brouillards acides;

- l'*oxygénation*. Ce procédé consiste à affiner le mercure filtré en extrayant les impuretés métalliques par oxydation obtenue par barbotage d'air. L'oxydation comprend deux phases: le barbotage et la filtration. Au cours de la première phase, le mercure contaminé est agité par de l'air dans un récipient clos de manière à oxyder les contaminants métalliques. Le mercure est ensuite filtré sur un lit de charbon actif pour retirer les oxydes métalliques solides;
- la *distillation en cornue*. Elle permet d'obtenir du mercure pur par volatilisation du mercure contenu dans les déchets solides. Les différentes étapes sont les suivantes: chauffage des déchets au moyen d'une source de chaleur extérieure dans une cuve de distillation fermée ou sur un empilement de plateaux pour vaporiser le mercure; condensation des vapeurs de mercure dans des condenseurs refroidis par eau; et collecte du condensat dans un récipient.

Le tableau 82.13 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du mercure ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du nickel

Les principales sources de matériaux de recyclage sont les alliages de type nickel-cuivre et nickel-aluminium que l'on peut trouver

Tableau 82.14 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du nickel, par opération

| Opération          | Expositions                        | Mesures techniques/administratives  |
|--------------------|------------------------------------|---|
| Triage des déchets | Poussières                         | Ventilation avec aspiration localisée et remplacement des solvants par des produits de substitution   |
| Dégraissage        | Solvants                           | Ventilation avec aspiration localisée et remplacement des solvants par des produits de substitution, ou récupération des solvants, ventilation générale   |
| Fusion             | Fumées, poussières, bruit, chaleur | Ventilation avec aspiration localisée, alternance travail/pauses, distribution de liquides; équipement de protection individuelle — protection respiratoire et protection de l'ouïe                       |
| Affinage           | Fumées, poussières, chaleur, bruit | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides; équipement de protection respiratoire — protection respiratoire et protection de l'ouïe |
| Coulée             | Chaleur, fumées métalliques        | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides  |

dans des déchets de fabrication ou anciens. Les déchets anciens sont notamment les pièces usagées de machines et d'avions, tandis que les déchets de fabrication se composent de chutes, de tournures et d'autres sous-produits solides de la fabrication des produits en alliage. La récupération et le recyclage du nickel comportent les étapes suivantes:

- le *triage*. Les ferrailles de nickel sont inspectées et triées à la main de manière à retirer les matériaux non métalliques et ceux qui ne contiennent pas de nickel. Le tri expose les travailleurs à des poussières;
- le *dégraissage*. Les ferrailles de nickel contenant du nickel sont dégraissées au trichloroéthylène. Le mélange est filtré ou centrifugé de manière à séparer les déchets de nickel. La solution de trichloroéthylène et de graisse est envoyée dans un circuit de récupération du solvant. Le dégraissage présente un risque d'exposition au solvant;
- le *four de fusion (rotatif, à arc électrique ou à réverbère)*. On charge les ferrailles de nickel dans un four à arc électrique et l'on ajoute un réducteur, généralement de la chaux. Le métal fondu est soit coulé en lingotières, soit envoyé directement vers un réacteur pour affinage. Il y a risque d'exposition à des fumées, à des poussières, au bruit et à la chaleur;
- l'*affinage au réacteur*. Le métal en fusion est introduit dans un réacteur où l'on ajoute d'abord des ferrailles froides et du nickel de première fusion, puis de la chaux et de la silice. On introduit ensuite des métaux tels que le manganèse, le niobium ou le titane pour obtenir l'alliage souhaité. Ces opérations présentent des risques d'exposition à des fumées, à des poussières, au bruit et à la chaleur;
- la *coulee des lingots*. Cette opération consiste à couler en lingots le métal en fusion provenant du four de fusion ou du réacteur d'affinage en versant le métal dans des moules où on le laisse refroidir. Les lingots sont ensuite démoulés. Il y a risque d'exposition à la chaleur et à des vapeurs métalliques.

Le tableau 82.14 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du nickel ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage des métaux précieux

Les matières premières secondaires employées par l'industrie des métaux précieux se composent à la fois de déchets anciens et de déchets de fabrication. Les déchets anciens comprennent les composants électroniques de matériels réformés d'origine civile ou militaire, ainsi que des résidus de dentisterie. Les déchets de fabrication proviennent de la fabrication des produits en métaux

précieux. Les métaux considérés sont les métaux élémentaires tels que l'or, l'argent, le platine et le palladium. Le recyclage des métaux précieux comprend les phases suivantes:

- le *triage manuel* et le *déchetage*. Les déchets contenant des métaux précieux sont triés à la main puis déchetés au broyeur à marteaux; les machines de broyage sont très bruyantes;
- l'*incinération*. Une fois triés, les résidus sont incinérés pour éliminer le papier, les matières plastiques et les liquides organiques. Cette opération risque d'exposer les travailleurs à des substances chimiques organiques, à des gaz de combustion et à des poussières;
- la *fusion au haut-fourneau*. Une fois traités, les déchets sont introduits dans un haut-fourneau avec du coke, un fondant et du laitier recyclé contenant des oxydes métalliques. La charge est fondue et scorifiée et l'on obtient du cuivre noir qui renferme les métaux précieux et une scorie vitrifiée qui contient la plupart des impuretés. Les risques potentiels liés à cette opération sont les poussières et le bruit;
- la *fusion au convertisseur*. Cette opération a pour but de parfaire la purification du cuivre noir par injection d'air à travers la masse en fusion dans le convertisseur. On retire les contaminants métalliques chargés de scories pour les recycler dans le haut-fourneau. Le cuivre noir renfermant les métaux précieux est coulé dans des moules;
- l'*affinage électrolytique*. Le cuivre noir sert d'anode dans une cuve d'électrolyse contenant un bain de sulfate de cuivre. Le cuivre se dépose sous forme pure sur la cathode, tandis que les métaux précieux tombent au fond de la cuve où ils sont recueillis à l'état de boues. L'électrolyse présente un risque d'exposition à des brouillards acides;
- l'*affinage chimique*. Les boues contenant des métaux précieux fournies par l'affinage électrolytique sont traitées chimiquement pour récupérer les différents métaux. Pour l'or et l'argent, on recourt à la cyanuration, mais on peut également les dissoudre dans de l'eau régale ou dans de l'acide nitrique avant de les précipiter au sulfate ferreux dans le cas de l'or ou au chlorure de sodium dans celui de l'argent. On peut récupérer le platine et les métaux du groupe platine en les dissolvant dans du plomb fondu, lequel est ensuite traité à l'acide nitrique pour fournir un résidu à partir duquel on peut précipiter sélectivement les métaux du groupe. Les précipités sont soit fondus, soit calcinés en vue de recueillir l'or et l'argent en grains et le platine sous forme d'éponges. Ces opérations impliquent un risque d'exposition aux acides.

Le tableau 82.15 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage des métaux précieux ainsi que les

Tableau 82.15 • Mesures techniques/administratives de prévention dans le recyclage des métaux précieux, par opération

| Opération                              | Expositions  | Mesures techniques/administratives   |
|--|--|--|
| Triage manuel et déchetage des déchets | Bruit des broyeurs à marteaux (éventuellement)       | Matériel de lutte contre le bruit; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe  |
| Incinération                           | Matières organiques, gaz de combustion et poussières | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Fusion                                 | Poussières, bruit                                    | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe et protection respiratoire                                       |
| Affinage électrolytique                | Brouillards acides                                   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Affinage chimique                      | Acides   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — vêtements résistant aux acides, lunettes de protection chimique |



Tableau 82.16 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du cadmium, par opération

| Opération                    | Expositions  | Mesures techniques/administratives  |
|------------------------------|--|---|
| Dégraissage des déchets      | Solvants et poussières de cadmium  | Ventilation avec aspiration localisée et remplacement des solvants par des produits de substitution   |
| Fusion/affinage des alliages | Produits de la combustion du mazout et des gaz, vapeurs de zinc, poussières et vapeurs de cadmium                              | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection respiratoire  |
| Distillation en cornue       | Fumées de cadmium  | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — protection respiratoire  |
| Fusion/dézingage             | Fumées et poussières de cadmium; fumées et poussières de zinc, chlorure de zinc, chlore, chlorure d'hydrogène, coup de chaleur | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides; équipement de protection individuelle — protection respiratoire |
| Coulée                       | Poussières et fumées de cadmium, chaleur   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides; équipement de protection individuelle — protection respiratoire |

moyens de prévention correspondants (voir au présent chapitre l'article «La fusion et l'affinage de l'or»).

#### La récupération et le recyclage du cadmium

Parmi les déchets anciens contenant du cadmium, on trouve les pièces cadmiées de véhicules ou de bateaux envoyés à la casse, les appareils ménagers, les articles de quincaillerie et les accessoires de fixation, les accumulateurs au cadmium, les contacts en cadmium provenant d'interrupteurs et de relais, et d'autres alliages de cadmium usagés. Quant aux déchets de fabrication, il s'agit généralement d'objets de rebut contenant des vapeurs de cadmium et de sous-produits contaminés des industries qui utilisent ce métal. Les procédés de récupération et de recyclage sont les suivants:

- la *prétraitement*. Il consiste en un dégraissage à la vapeur des déchets d'alliages. Des vapeurs de solvant obtenues par chauffage de solvants recyclés circulent dans une cuve contenant les alliages. Le solvant et les graisses entraînées par la vapeur sont ensuite condensés et séparés, le solvant étant recyclé. Au cours de cette opération, il y a un risque d'exposition à des poussières de cadmium et à des solvants;
- la *fusion/affinage*. Lors de cette opération, les déchets prétraités d'alliages de cadmium ou de cadmium pur sont traités de manière à éliminer les impuretés qui pourraient subsister et à obtenir un alliage de cadmium ou du cadmium élémentaire. Les risques sont l'exposition aux produits de la combustion du mazout et du gaz, ainsi qu'à des poussières de zinc et de cadmium;

- la *distillation en cornue*. Les déchets d'alliages dégraissés sont chargés dans une cornue où ils sont chauffés pour obtenir des vapeurs de cadmium qui sont ensuite recueillies dans un condenseur. Le métal fondu peut alors être coulé. Il y a risque d'exposition à des poussières de cadmium;
- la *fusion/dézingage*. Le cadmium métal est chargé dans un creuset où il est chauffé jusqu'à la fusion. S'il contient du zinc, on ajoute des fondants et des agents de chloration pour l'éliminer. Les travailleurs risquent d'être exposés à des fumées et à des poussières de cadmium, à des fumées et à des poussières de zinc, à du chlorure de zinc, à du chlore, à du chlorure d'hydrogène ainsi qu'à la chaleur;
- la *coulée*. Cette opération permet de réaliser les produits souhaités à partir de l'alliage de cadmium purifié ou du cadmium métal obtenus lors de l'étape précédente. Les travailleurs risquent d'être exposés à des poussières et à des fumées de cadmium ainsi qu'à la chaleur.

Le tableau 82.16 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du cadmium ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du sélénium

Les matières premières secondaires sont ici les cylindres de xérogaphie usagés et les résidus de la fabrication des redresseurs au sélénium. Chaque phase du cycle de recyclage présente un risque d'exposition aux poussières de sélénium. La distillation et la fusion

Tableau 82.17 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du sélénium, par opération

| Opération                 | Expositions  | Mesures techniques/administratives   |
|---------------------------|--|--|
| Prétraitement des déchets | Poussières   | Ventilation avec aspiration localisée  |
| Fusion en cornue          | Gaz et poussières de combustion, bruit                   | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe; réduction du bruit des brûleurs |
| Affinage                  | Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ), brouillards acides | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — lunettes de protection chimique   |
| Distillation              | Poussières et produits de combustion                     | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Trempe                    | Poussières métalliques                                   | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Coulée                    | Fumées de sélénium                                       | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |

au four à cornue peuvent engendrer des émissions de combustion et des poussières. La fusion au four à cornue est bruyante. Les opérations d'affinage produisent des brouillards de dioxyde de soufre et des brouillards acides. Les opérations de coulée présentent un risque d'exposition aux poussières métalliques (voir tableau 82.17). Les procédés de récupération et de recyclage sont les suivants:

- le *prétraitement des déchets*. Ce procédé sépare le sélénium par des moyens mécaniques tels que broyeur à marteaux ou grenail- lage;
- la *fusion au four à cornue*. Elle permet de purifier et de concentrer les résidus prétraités au moyen d'une fusion suivie d'une distillation qui sépare le sélénium des impuretés;
- l'*affinage*. Il purifie les résidus de sélénium par lixiviation avec un solvant adapté tel qu'une solution aqueuse de sulfite de sodium. Les impuretés insolubles sont éliminées par filtration, le filtrat étant ensuite traité de manière à précipiter le sélénium;
- la *distillation*. Elle produit du sélénium de très haute pureté. Le sélénium est fondu et distillé; les vapeurs sont condensées pour être envoyées sous forme de sélénium liquide aux ateliers de fabrication;
- la *trempe*. Ce procédé sert à obtenir du sélénium purifié sous forme de grenaille et de poudre. La grenaille est produite à partir de sélénium en fusion; elle est ensuite séchée. Le mode de fabrication de la poudre est similaire mais, dans ce cas, le procédé de trempe est appliqué à des vapeurs de sélénium et non pas à du sélénium fondu;
- la *coulée*. Cette opération est destinée à produire des lingots ou d'autres formes à partir du sélénium en fusion. On coule du sélénium en fusion dans des moules de dimensions et de forme appropriées qui sont ensuite refroidis pour solidifier le métal.

#### La récupération et le recyclage du cobalt

Les matières premières secondaires sont ici des résidus de meulage et des tournures de superalliages, ainsi que des pièces de moteur et des ailettes de turbine réformées. Les étapes de la récupération et du recyclage sont les suivantes:

- le *triage à la main*. Les déchets bruts de collecte sont triés à la main pour identifier et séparer les matériaux selon qu'ils contiennent du cobalt, du nickel ou des éléments non recyclables. Ce tri est une cause d'exposition aux poussières;
- le *dégraissage*. Une fois triés, les déchets souillés sont chargés dans un appareil de dégraissage où circulent des vapeurs de

perchloroéthylène. Ce solvant dissout les graisses et l'huile présentes sur les déchets. Le mélange vapeur de solvant-huile-graisse est ensuite condensé et le solvant est remis en circulation. Il y a risque d'exposition au solvant;

- le *décapage*. Les déchets dégraissés sont décapés par sablage ou grenail- lage afin d'enlever les impuretés, les oxydes et la rouille. Selon la nature du produit utilisé pour le sablage ou le grenail- lage, il peut y avoir émissions de poussières;
- le *traitement aux acides*. Après le grenail- lage, les déchets sont traités aux acides pour éliminer ce qui pourrait rester de rouille et d'oxydes. Il y a risque d'exposition à des brouillards acides;
- la *fusion sous vide*. Une fois nettoyés, les déchets métalliques sont introduits dans un four à vide et fondus à l'arc électrique ou par induction. Il existe des risques d'exposition à des métaux lourds;
- la *coulée*. L'alliage fondu est coulé en lingots; cette opération présente un risque de coup de chaleur.

Le tableau 82.18 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du cobalt ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage de l'étain

Les principales sources de matières premières secondaires sont les chutes de tôles d'acier étamées, les rebuts provenant des fabricants de boîtes étamées, les rebuts de bobines d'étamage issues de la sidérurgie, les crasses et les boues d'étain, les scories et les déchets de soudure à l'étain, le bronze ancien, les pièces manquées en bronze et les ferrailles à refondre. Beaucoup de procédés ci-après peuvent être des sources d'exposition à des poussières d'étain et à des brouillards acides:

- le *désaluminage*. On procède ici par lixiviation à la soude caustique chaude des déchets de boîtes étamées pour séparer l'aluminium sous forme de solution d'aluminate de sodium; la solution est ensuite transférée par pompage vers le raffinage pour récupérer l'étain soluble d'une part et les déchets métalliques d'étain désaluminés d'autre part;
- le *mélangeage par charges discontinues*. Il s'agit d'une opération mécanique au cours de laquelle on prépare la charge d'un four de fusion en mélangeant des crasses et des boues ayant une teneur suffisante en étain;
- le *désétamage chimique*. Ce procédé a pour but d'extraire l'étain contenu dans les déchets. On ajoute une solution chaude de soude caustique, de nitrite ou de nitrate de sodium à des résidus industriels désaluminés ou bruts. Une fois terminée la réaction

Tableau 82.18 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du cobalt, par opération

| Opération                 | Expositions  | Mesures techniques/administratives   |
|---------------------------|--|--|
| Triage manuel des déchets | Poussières   | Lavage au jet  |
| Dégraissage               | Solvants   | Récupération des solvants, ventilation avec aspiration localisée et remplacement des solvants par des produits de substitution   |
| Sablage/grenail- lage     | Poussières — toxicité selon le type de matière utilisé | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle en fonction des risques physiques et protection respiratoire selon le type de matière utilisé |
| Traitement aux acides     | Brouillards acides                                     | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale; équipement de protection individuelle — protection respiratoire   |
| Fusion sous vide          | Métaux lourds  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale  |
| Coulée                    | Chaleur  | Ventilation avec aspiration localisée, ventilation générale, alternance travail/pauses, distribution de liquides   |

Tableau 82.19 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage de l'étain, par opération

| Opération                                | Expositions                                      | Mesures techniques/administratives   |
|--|--|--|
| Désaluminage                             | Hydroxyde de sodium                              | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — lunettes de protection chimique ou écran facial                         |
| Mélangeage par charges discontinues      | Poussières                                       | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale  |
| Désétamage chimique                      | Matières caustiques                              | Ventilation avec aspiration localisée; équipement de protection individuelle — lunettes de protection chimique ou écran facial                         |
| Fusion des écumes                        | Poussières et chaleur                            | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; alternance travail/pauses; distribution de liquides                                     |
| Lixiviation et filtration des poussières | Poussières                                       | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale  |
| Décantation et filtration                | Pas d'exposition connue                          | Pas d'exposition connue  |
| Évapocentrifugation                      | Pas d'exposition connue                          | Pas d'exposition connue  |
| Affinage électrolytique                  | Brouillards acides                               | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; équipement de protection individuelle — lunettes de protection chimique ou écran facial |
| Acidification et filtration              | Brouillards acides                               | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; équipement de protection individuelle — lunettes de protection chimique ou écran facial |
| Affinage au feu                          | Chaleur  | Alternance travail/pauses; équipement de protection individuelle   |
| Fusion                                   | Gaz, fumées et poussières de combustion, chaleur | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; alternance travail/pauses; équipement de protection individuelle                        |
| Calcination                              | Poussières, fumées, chaleur                      | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; alternance travail/pauses; équipement de protection individuelle                        |
| Affinage en cuve                         | Poussières, fumées, chaleur                      | Ventilation avec aspiration localisée et ventilation générale; alternance travail/pauses; équipement de protection individuelle                        |

de désétamage, la solution est recueillie et envoyée par pompage à l'affinage/coulée. Les produits désétamés sont ensuite lavés;

- la *fusion des écumes*. Elle vise à purifier partiellement les écumes et à obtenir de l'étain brut en faisant fondre la charge et en recueillant le métal brut d'une part, les mattes et les scories, de l'autre;
- la *lixiviation* et la *filtration des poussières*. Ce procédé permet d'extraire le zinc et le chlore contenus dans les poussières de gueulard par lixiviation à l'acide sulfurique; on filtre le mélange pour séparer l'acide, le zinc et le chlore dissous des poussières ainsi lixiviées qui sont ensuite séchées dans un séchoir. Ces poussières, riches en étain et en plomb, sont enfin renvoyées par des appareils mécaniques vers les opérations de mélange des charges;
- la *décantation* et la *filtration*. Cette opération purifie la solution de stannate de sodium fournie par le désétamage chimique. Les impuretés (argent, mercure, cuivre, cadmium, un peu de fer, de cobalt et de nickel) sont précipitées sous forme de sulfures;
- l'*évapocentrifugation*. À partir de la solution purifiée, on concentre le stannate de sodium par évaporation, cristallisation et on le récupère par centrifugation;
- l'*affinage électrolytique*. Il permet d'obtenir de l'étain de haute pureté à partir de la solution purifiée de stannate de sodium que l'on fait passer par des cuves d'électrolyse. Quand l'étain s'est déposé sur les cathodes, on extrait celles-ci pour en détacher l'étain;
- l'*acidification* et la *filtration*. Avec ce procédé, on obtient à partir de la solution de stannate de sodium purifiée un oxyde d'étain hydraté. Celui-ci peut être soit traité pour donner l'oxyde anhydre, soit fondu pour obtenir de l'étain métal. L'oxyde hydraté est neutralisé à l'acide sulfurique pour former l'oxyde d'étain hydraté et filtré pour séparer l'hydrate qui forme un gâteau;

- l'*affinage au feu*. Ce procédé produit de l'étain de très haute pureté à partir d'étain cathodique. La charge est fondue, les impuretés retirées sous forme de crasses et de scories, et l'étain en fusion est coulé dans des moules;
- la *fusion*. On a recours à ce procédé lorsque l'affinage électrolytique est impossible. Pour ce faire, on réduit l'oxyde d'étain hydraté au moyen d'un réducteur, on fond l'étain métallique ainsi obtenu et on coule l'étain en fusion après écumage des crasses;
- la *calcination*. Avec ce procédé, on transforme les oxydes d'étain hydratés en oxydes stanniques anhydres en calcinant l'hydrate; une fois extraits, les oxydes stanniques sont conditionnés en emballages;
- l'*affinage en cuve*. Par ce procédé, on purifie le métal brut de fonderie en le chargeant dans une cuve préchauffée, en séchant les crasses pour éliminer les impuretés que l'on recueille sous forme de scories et de matte, en ajoutant du soufre pour recueillir le cuivre sous forme de matte, puis de l'aluminium pour extraire l'antimoine, après quoi le métal en fusion est coulé en saumons.

Le tableau 82.19 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage de l'étain ainsi que les moyens de prévention correspondants.

#### La récupération et le recyclage du titane

Les deux principales sources de déchets de titane sont l'industrie du titane et les consommateurs. Les déchets de production interne provenant de l'usinage et de la fabrication de produits en titane comprennent les rognures, les rebuts de plaques, les chutes et les tournures. Les déchets provenant des consommateurs sont les

Tableau 82.20 • Mesures techniques/administratives de prévention des risques dans le recyclage du titane, par opération

| Opération               | Expositions             | Mesures techniques/administratives   |
|-------------------------|-------------------------|--|
| Dégraissage au solvant  | Solvant                 | Ventilation avec aspiration localisée et récupération du solvant   |
| Décapage                | Acides                  | Ecrans faciaux, tabliers, manches longues, lunettes de protection chimique   |
| Affinage électrolytique | Pas d'exposition connue | Pas d'exposition connue  |
| Fusion                  | Métaux volatils, bruit  | Ventilation avec aspiration localisée et réduction du bruit des brûleurs; équipement de protection individuelle — protection de l'ouïe |
| Coulée                  | Chaleur                 | Équipement de protection individuelle  |

produits déjà utilisés. Les opérations de récupération et de recyclage sont les suivantes:

- le *dégraissage*. Les déchets calibrés sont traités au moyen d'un solvant organique en phase vapeur, du trichloroéthylène, par exemple. Les vapeurs de solvant dissolvent les graisses et les huiles qui contaminent les déchets. Le solvant circule en circuit fermé tant que sa capacité de dégraissage est suffisante, après quoi il peut être régénéré. Le dégraissage peut également être effectué à la vapeur et avec un détergent;
- le *décapage à l'acide*. La lixiviation par une solution d'acides chlorhydrique et fluorhydrique permet d'éliminer la couche d'oxyde qui s'est formée pendant le dégraissage. Les déchets sont ensuite lavés à l'eau puis séchés;
- l'*affinage électrolytique*. Il s'agit d'un prétraitement des déchets de titane par affinage électrolytique dans un sel fondu;
- la *fusion*. Les déchets de titane prétraités et des éléments d'alliages sont fondus sous vide dans un four à arc électrique pour produire un alliage de titane. Les éléments d'alliage peuvent être l'aluminium, le vanadium, le molybdène, l'étain, le zirconium, le palladium, le niobium et le chrome;
- la *coulée*. Le titane fondu est coulé dans des lingotières.

Le tableau 82.20 énumère les risques d'exposition liés à la récupération et au recyclage du titane, ainsi que les moyens de prévention correspondants.

## ● LES PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT POSÉS PAR LES TRAITEMENTS DE SURFACE DES MÉTAUX ET LES REVÊTEMENTS INDUSTRIELS

Stewart Forbes

### Les traitements de surface des métaux

Les traitements de surface des métaux ont pour but d'en accroître la durabilité et d'en améliorer l'aspect. Un même produit peut subir plusieurs traitements de surface — par exemple, un élément de carrosserie automobile peut être phosphaté, puis recevoir une couche de fond avant d'être peint. Le présent article traite des procédés utilisés pour le traitement de surface des métaux, ainsi que des méthodes employées pour limiter leur impact sur l'environnement.

L'exploitation d'une entreprise de traitements de surface des métaux implique une coopération entre la direction, le personnel, les pouvoirs publics et la collectivité afin de réduire efficacement les répercussions environnementales des procédés mis en œuvre. Le public est préoccupé par le niveau et les effets à long terme de la pollution de l'air, des eaux et des sols. Il ne peut y avoir de *gestion environnementale efficace* sans une connaissance approfondie de tous les facteurs, qu'il s'agisse des produits chimiques, des métaux, des procédés ou des extraits.

L'*organisation de la prévention des pollutions* oblige à aborder la gestion environnementale plus en amont; au lieu de réagir aux problèmes à mesure qu'ils se présentent, il s'agit de les anticiper par des solutions qui privilégient le remplacement de produits chimiques par des produits moins dangereux, la modification des procédés de fabrication et le recyclage en interne. La marche à suivre est alors la suivante:

1. introduire une démarche de prévention des pollutions à tous les niveaux de l'entreprise;
2. identifier les flux de déchets;
3. fixer des priorités;
4. remonter à l'origine des déchets;
5. déterminer et appliquer les changements qui permettent de réduire ou d'éliminer les déchets;
6. mesurer les résultats.

Il est possible de lancer un processus d'amélioration permanente en fixant régulièrement de nouvelles priorités et en répétant la séquence ci-dessus.

Une étude détaillée et documentée des procédés de fabrication permet de repérer les flux de déchets et de déterminer par ordre de priorité les mesures à prendre pour les limiter. En matière de changements, les décisions prises après étude pourront déboucher sur les actions ci-après:

- des améliorations faciles à mettre en œuvre au niveau des opérations;
- des modifications des procédés après consultation des clients et des fournisseurs;
- le passage à des activités moins nocives lorsque cela est possible;
- la réutilisation et le recyclage quand le changement pose trop de problèmes;
- le recours, uniquement en dernier ressort, à la mise en décharge des déchets dangereux.

### Les principaux procédés et les modes opératoires

Un *nettoyage* s'impose dans la mesure où tous les procédés de traitement des surfaces métalliques ne doivent être appliqués qu'à des pièces exemptes de souillures organiques et minérales, y compris l'huile, la calamine et les produits de satinage et de polissage. Il existe trois grandes catégories de produits employés pour le nettoyage: les solvants, les dégraissants en phase vapeur et les détergents alcalins.

Dans tous les cas où le nettoyage doit précéder un procédé par voie humide, les méthodes utilisant des solvants et la phase vapeur ont été presque entièrement remplacées par l'emploi de produits alcalins. On emploie encore les solvants et les dégraissants en phase vapeur pour obtenir des pièces propres et sèches dont le nettoyage n'est pas suivi d'un traitement par voie humide. Dans certains cas, des solvants tels que les terpènes sont substitués aux solvants volatils. Pour le dégraissage en phase vapeur, des substances moins toxiques telles que le 1,1,1-trichloroéthane ont remplacé des produits plus dangereux (encore que ce solvant soit de moins en moins utilisé, car il cause l'appauvrissement de la couche d'ozone).

Les cycles de nettoyage alcalin comportent normalement un trempé suivi d'un nettoyage électrolytique anodique, puis d'une immersion dans un bain d'acide dilué. Le nettoyage de l'aluminium

est généralement effectué au moyen d'agents non caustiques, sans silicates. Les acides le plus souvent employés en nettoyage sont l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique.

L'*anodisation* est un procédé électrochimique destiné à épaissir la pellicule d'oxyde présente à la surface du métal (procédé fréquemment retenu pour l'aluminium) par traitement des pièces au moyen de solutions diluées d'acide chromique ou d'acide sulfurique.

La *conversion chimique* a pour rôle de faciliter l'accrochage des peintures ou d'assurer par passivation une protection contre la corrosion. Dans le cas du chromage, les pièces sont immergées dans une solution de chrome hexavalent avec des agents actifs organiques et minéraux. Pour la phosphatation, les pièces sont immergées dans de l'acide phosphorique dilué avec d'autres agents. Quant à la passivation, elle s'effectue par immersion dans de l'acide nitrique ou de l'acide nitrique additionné de dichromate de sodium.

Les *dépôts chimiques non électrolytiques* permettent de déposer du métal sans courant électrique, comme du cuivre ou du nickel pour la fabrication de circuits imprimés.

Avec la *galvanoplastie*, on dépose une fine couche de métal (zinc, nickel, cuivre, chrome, cadmium, étain, laiton, bronze, plomb, étain-plomb, or, argent ou autres métaux tels que platine) sur un substrat (ferreux ou non). Les bains utilisés peuvent être acides, alcalins, neutres ou cyanurés (voir figure 82.7).

Le *dérochage* et le *décapage par voie chimique* sont des procédés de dissolution contrôlée par immersion dans des réactifs chimiques et des produits caustiques. C'est ainsi que l'aluminium est généralement décapé à la soude avant anodisation ou brillantage chimique dans une solution pouvant contenir de l'acide nitrique, de l'acide phosphorique ou de l'acide sulfurique.

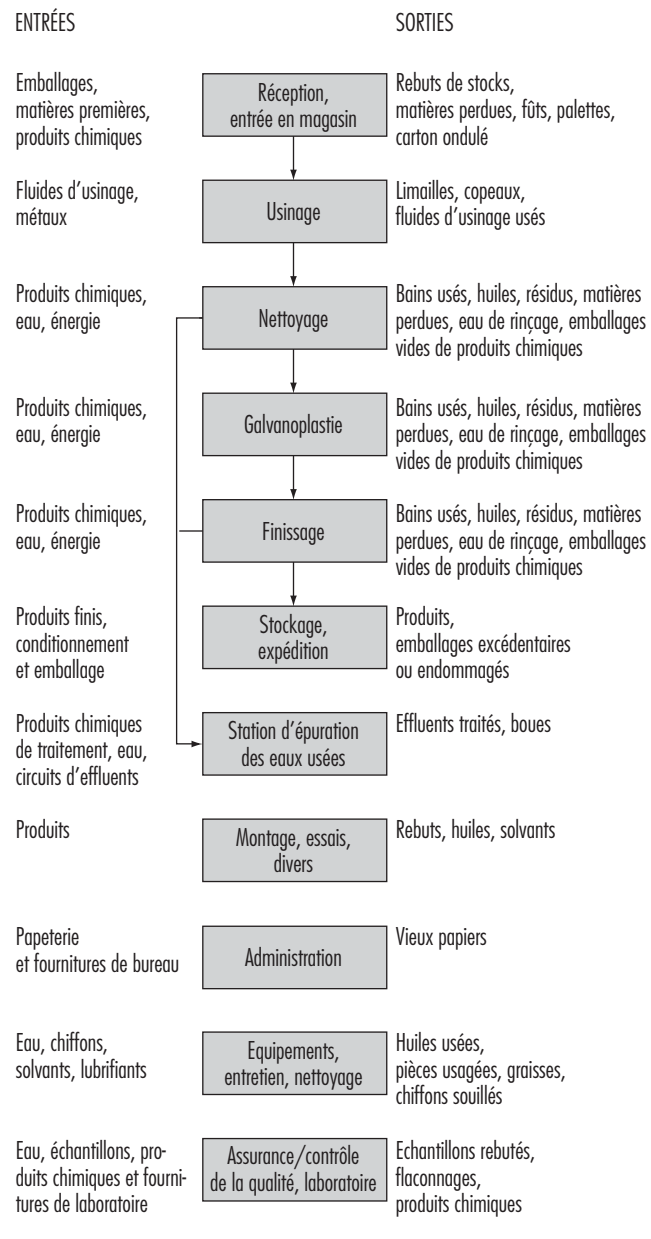
Avec le *revêtement métallique à chaud au trempé*, on applique du métal sur une pièce par immersion dans un bain de métal en fusion (zincage ou étamage de l'acier).

### Les bonnes pratiques de gestion

Un certain nombre de perfectionnements apportés aux procédés de fabrication peuvent entraîner d'importantes améliorations en termes de sécurité, de santé et de protection de l'environnement. Voici les principaux :

- l'utilisation du rinçage en cascade inverse et de contrôles de la conductivité;
- l'allongement de la durée d'égouttage;
- l'emploi d'agents mouillants en plus grande quantité ou de meilleure qualité;
- le maintien de températures de traitement aussi élevées que possible pour abaisser la viscosité et réduire les pertes par entraînement du bain (c'est-à-dire la quantité de solution restant sur le métal);
- l'accroissement de l'efficacité du rinçage en le combinant à une agitation par bullage d'air;
- la couverture de la surface des bains de galvanoplastie avec des billes en plastique pour réduire la formation de brouillards;
- l'amélioration du filtrage des bains de galvanoplastie de manière à espacer les opérations de régénération;
- la construction d'un muret autour des zones de traitement pour contenir les débords accidentels de liquides dangereux;
- l'emploi de procédés de traitement séparés pour les métaux récupérables tels que le nickel;
- l'installation de systèmes de récupération tels que l'échange d'ions, l'évaporation atmosphérique ou sous vide, la récupération électrolytique, l'osmose inverse et l'électrodialyse;
- l'application, pour compléter les systèmes de récupération des pertes par entraînement, de méthodes réduisant l'introduction de contaminants par entraînement et améliorant les systèmes de nettoyage;

Figure 82.7 • Entrées et sorties d'une ligne de galvanoplastie courante



- la mise en œuvre de méthodes modernes de gestion des stocks pour réduire le gaspillage et les risques encourus aux postes de travail;
- l'application de procédures standards (procédures écrites, contrôles réguliers d'efficacité et journaux d'exploitation rigoureusement tenus) en tant que base à une structure efficace de gestion environnementale.

### La planification environnementale concernant des déchets spécifiques

Il est possible de limiter les flux de déchets spéciaux (généralement les solutions épuisées) au moyen des techniques ci-après :

- la *filtration*. Des filtres à cartouche ou à diatomées peuvent être utilisés pour empêcher l'accumulation de matières solides, qui nuit au rendement des procédés;
  - le *traitement au charbon actif*. Il permet de retirer les contaminants organiques (il est surtout utilisé pour le nickelage, le cuivrage, le zingage et le cadmiage);
  - l'*eau purifiée*. Les contaminants naturels présents dans les eaux d'apport et de rinçage (calcium, fer, magnésium, manganèse, chlore et carbonates, par exemple) peuvent être éliminés par désionisation, distillation ou osmose inverse. L'amélioration de l'efficacité des eaux de rinçage réduit le volume des boues à traiter;
  - la *congélation des carbonates dans un bain de cyanure*. En abaissant la température du bain à  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , on cristallise les carbonates qui se forment dans le bain de cyanure du fait de la décomposition du cyanure, de densités de courant excessives à l'anode et de l'adsorption du dioxyde de carbone de l'air, ce qui facilite leur élimination;
  - la *précipitation*. L'élimination des contaminants métalliques qui pénètrent dans le bain sous forme d'inclusions dans les anodes peut être réalisée par précipitation au cyanure ou à l'hydroxyde de baryum, à l'hydrate ou au sulfate de calcium ou encore au cyanure de calcium;
  - les *produits de substitution du chrome hexavalent*. Pour les plaquages de fantaisie, le chrome hexavalent des solutions peut être remplacé par du chrome trivalent. S'agissant des traitements avant peinture, il est parfois possible de remplacer les revêtements par conversion au chrome par des revêtements par conversion sans chrome ou des procédés chimiques à base de chrome sans rinçage;
  - les *composés chimiques pour procédés non chélatés*. Au lieu d'ajouter des chélateurs aux bains pour maîtriser la concentration d'ions libres dans la solution, on peut utiliser des composés chimiques non chélatés qui dispensent de maintenir les métaux en solution. On peut laisser ces métaux précipiter et les recueillir par filtration continue;
  - les *composés chimiques pour procédés sans cyanure*. Les déchets contenant du cyanure libre sont généralement traités à l'hypochlorite ou au chlore pour réaliser l'oxydation, tandis que les cyanures complexes sont communément précipités au moyen de sulfate ferreux. Le recours à des procédés sans cyanure élimine une étape du traitement et réduit le volume des boues;
  - le *dégraissage aux solvants*. Au lieu de dégraisser les pièces aux solvants avant de les traiter, on peut utiliser des bains alcalins chauds. L'efficacité des agents alcalins peut être renforcée par des procédés utilisant le courant électrique ou les ultrasons. Les avantages que comporte le fait d'éviter la production de vapeurs de solvant et de boues l'emportent bien souvent sur les éventuels surcoûts d'exploitation;
  - les *produits de nettoyage alcalins*. Afin d'éviter d'avoir à rejeter des nettoyants alcalins lorsque l'accumulation d'huile, de graisse et de souillures finit par dégrader le rendement du bain, on peut utiliser des dispositifs d'écémage pour éliminer les huiles surnageantes, des dispositifs de sédimentation ou des filtres à cartouche pour retirer les particules et les coalesceurs huile-eau, et recourir à la microfiltration ou à l'ultrafiltration pour extraire les huiles émulsionnées;
  - la *réduction des pertes par entraînement*. En réduisant le volume des pertes par entraînement dans les bains, on contribue à réduire la quantité des substances chimiques utiles retrouvées dans l'eau de rinçage et, par là même, à diminuer la quantité de boues produites par un procédé classique de traitement des métaux par précipitation.
- Il est possible d'agir sur plusieurs paramètres pour réduire les pertes par entraînement:
- la *concentration du bain*. La concentration chimique sera aussi faible que possible pour abaisser la viscosité (et permettre un égouttage plus rapide) et réduire la quantité de substances chimiques contenues dans le film;
  - la *température du bain*. On peut réduire la viscosité de la solution en augmentant la température du bain;
  - les *agents mouillants*. La tension superficielle de la solution peut être abaissée par l'addition d'agents mouillants;
  - le *positionnement de la pièce*. Il convient de veiller à placer la pièce dans le panier de telle manière que le film adhérent s'égoutte librement, sans rester piégé dans des rainures ou des trous borgnes;
  - la *durée d'émersion ou d'égouttage*. Plus la pièce est sortie rapidement du bain, plus le film entraîné à la surface est épais;
  - le *soufflage par lames d'air*. En soufflant de l'air sur la pièce au moment où le panier est soulevé hors du bain, on peut améliorer l'égouttage et le séchage;
  - les *rinçages par pulvérisation*. Ils peuvent être mis en œuvre au-dessus de bains chauffés de manière que le débit du rinçage soit égal au taux d'évaporation du bain;
  - les *bains de galvanoplastie*. On élimine les carbonates et les contaminants organiques pour empêcher l'accumulation de polluants qui pourraient accroître la viscosité du bain;
  - les *plateaux d'égouttage*. Les espaces entre les cuves sont recouverts de plateaux d'égouttage pour récupérer les solutions et les renvoyer au bain;
  - les *cuves de prérinçage*. Avant le rinçage proprement dit, les pièces sont placées dans des cuves de rinçage statique («rinçage mort»).
- La récupération des substances chimiques entraînées fait appel à diverses techniques:
- l'*évaporation*. Les évaporateurs atmosphériques sont actuellement les plus répandus, mais les appareils de concentration sous vide permettent de réaliser des économies d'énergie;
  - l'*échange d'ions*. Il est employé pour la récupération de produits chimiques dans les eaux de rinçage;
  - l'*extraction électrolytique*. Il s'agit d'un procédé par lequel les métaux dissous dans la solution se déposent sur la cathode après réduction. Le métal ainsi déposé est ensuite récupéré;
  - l'*électrodialyse*. Ce procédé utilise des membranes perméables aux ions et un courant électrique pour extraire les espèces ioniques de la solution;
  - l'*osmose inverse*. Ce procédé fait appel à une membrane semi-perméable pour produire de l'eau purifiée et une solution ionique concentrée. On utilise une pression élevée pour forcer l'eau à traverser la membrane tandis que cette dernière retient la plus grande partie des sels dissous.

### Les eaux de rinçage

La majeure partie des résidus dangereux produits dans les ateliers de traitement des surfaces métalliques se retrouvent dans les eaux usées des opérations de rinçage consécutives au nettoyage et à la galvanoplastie.

L'amélioration de l'efficacité du rinçage permet de réduire notablement les quantités d'eaux usées. Il existe pour cela deux stratégies de base. La première consiste à créer des turbulences entre la pièce et l'eau par pulvérisation ou agitation des eaux de rinçage, ou encore en déplaçant le panier ou en injectant un jet d'eau ou d'air sous pression. La seconde vise à augmenter le temps de contact entre la pièce et les eaux de rinçage. Des cuves multiples, installées en cascade, dans lesquelles l'eau circule à contre-courant, permettent de réduire la quantité des eaux de rinçage.

### Les produits industriels de revêtement

On entend par *revêtements* l'ensemble des peintures, vernis, laques, émaux et gommés-laques, mastics, enduits et bouche-pores pour

bois, décapants de peintures et vernis, produits de nettoyage des brosses et autres préparations assimilées. Les revêtements liquides contiennent des pigments et des additifs en dispersion dans un mélange liquide de liants et de solvants. Les pigments sont des composés minéraux ou organiques qui confèrent au revêtement sa teinte et son opacité, et influent sur sa fluidité et sa durabilité. Ils contiennent souvent des métaux lourds: cadmium, plomb, zinc, chrome et cobalt. Le liant améliore l'adhérence, la cohésion et la consistance du revêtement; c'est le composant principal qui reste à la surface une fois le travail achevé. Parmi les liants, on trouve toute une variété d'huiles, de résines, de caoutchoucs et de polymères. Des additifs tels que des charges ou des diluants peuvent être ajoutés aux produits pour abaisser leur coût de fabrication et rendre le revêtement plus durable.

Les solvants organiques utilisés dans les produits de revêtement sont des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, des esters, des cétones, des éthers de glycol et des alcools. Les solvants dispersent ou dissolvent les liants et font diminuer la viscosité et l'épaisseur du revêtement. Les solvants mis en œuvre dans les formulations de revêtement sont dangereux, car bon nombre d'entre eux sont non seulement cancérigènes pour l'être humain, mais aussi inflammables ou explosibles. La plupart des solvants contenus dans les produits de revêtement s'évaporent au séchage en dégageant des composés organiques volatils (COV). Les émissions de COV sont de plus en plus réglementées étant donné leurs effets nocifs sur la santé et l'environnement. Les problèmes d'environnement que posent les ingrédients classiques, les techniques actuelles d'application et les déchets de produits de revêtement incitent fortement à mettre au point d'autres produits et techniques permettant d'éviter les pollutions.

La plupart des produits de revêtement sont utilisés dans la construction, l'industrie ou pour des usages spéciaux. Dans la construction, ils sont appliqués sur les bâtiments et des produits destinés aux bâtiments, ainsi qu'à des fins de décoration et de protection, comme c'est le cas des vernis destinés à protéger le bois. Dans l'industrie, de nombreux procédés de fabrication les plus divers impliquent une opération de revêtement. En particulier, les fabricants d'automobiles, d'emballages métalliques, de machines agricoles, de tôles prélaquées, de meubles et d'accessoires en bois et en métal ainsi que d'appareils ménagers figurent parmi les principaux consommateurs industriels de produits de revêtement.

La formulation d'un produit de revêtement dépend de sa destination. Les revêtements jouent un rôle esthétique, préviennent la corrosion et protègent les surfaces. Le coût, la fonction, la sûreté du produit, la protection de l'environnement, le rendement et la vitesse de séchage sont autant de facteurs qui déterminent le choix des formulations.

### **Les procédés de revêtement**

La plupart des procédés de revêtement comportent cinq étapes: la manipulation et la préparation des matières premières; la préparation des surfaces; l'application du revêtement; le nettoyage du matériel; et la gestion des déchets.

### **La manipulation et la préparation des matières premières**

La manipulation et la préparation des matières premières comprennent le stockage, le mélangeage, la dilution et le dosage des produits de revêtement, ainsi que le transport des matières premières dans l'installation. Des procédures et des pratiques de suivi et de manipulation s'imposent si l'on veut réduire au minimum la production de déchets résultant de l'altération des produits ou de la préparation de formulations non conformes et impropres à l'emploi par suite d'une dilution excessive, par exemple. Le transfert, manuel ou par canalisation, doit être organisé de manière à éviter tout gaspillage.

### **La préparation des surfaces**

La technique de préparation utilisée dépend de la surface à revêtir, du revêtement antérieur, de l'importance des souillures et des graisses, du revêtement à appliquer et de la finition souhaitée. Les préparations les plus courantes sont le dégraissage, le traitement avant revêtement ou la phosphatation et le décapage des revêtements antérieurs. Pour la finition de surfaces métalliques, le dégraissage est effectué par essuyage au solvant, nettoyage à froid ou dégraissage en phase vapeur avec des solvants halogénés, dégraissage aux solutions alcalines, nettoyage en phase semi-aqueuse ou aux hydrocarbures aliphatiques pour éliminer les souillures organiques, la crasse, l'huile et la graisse; quant aux décapages à l'acide, par abrasion ou à la flamme, ils sont utilisés pour retirer la calamine et la rouille.

Outre le nettoyage, la préparation la plus commune des surfaces métalliques est la phosphatation qui a pour but de favoriser l'accrochage de revêtements organiques sur les surfaces métalliques et de retarder la corrosion. La phosphatation est réalisée en appliquant sur les surfaces métalliques une solution de phosphate de zinc, de fer ou de manganèse par immersion ou aspersion. La phosphatation est un procédé de finition des surfaces semblable à la galvanoplastie, qui fait appel à une série de bains de traitement et de rinçage dans lesquels les pièces sont immergées pour obtenir la préparation souhaitée (voir au présent chapitre l'article «Le traitement de surface des métaux»).

Le décapage chimique ou mécanique des revêtements antérieurs est effectué sur des surfaces que l'on souhaite recouvrir d'un nouveau revêtement, réparer ou inspecter. La méthode la plus communément utilisée est le décapage aux solvants. Les solutions employées contiennent généralement du phénol, du chlorure de méthylène et un acide organique afin de dissoudre l'ancien revêtement. Le rinçage final à grande eau, destiné à éliminer les substances chimiques, peut générer de grandes quantités d'eaux usées. En ce qui concerne les procédés mécaniques, c'est la projection d'abrasifs qui est la plus répandue; il s'agit d'une opération par voie sèche qui utilise l'air comprimé pour projeter de la grenaille, du sable, des billes, etc., contre la surface à décapier.

Les opérations de préparation des surfaces influent sur la quantité de déchets produits par le procédé retenu. Si la préparation de la surface est inadaptée, le revêtement est de mauvaise qualité et son décapage et l'application d'un nouveau revêtement sont sources de nouveaux déchets.

### **L'application du revêtement**

L'opération de revêtement comporte l'application du produit sur la surface, puis son séchage ou durcissement. La plupart des techniques d'application appartiennent à l'une des cinq grandes catégories suivantes: revêtement au trempé, par imprégnation au rouleau, par aspersion, par pistelage et, enfin et surtout, par pulvérisation au pistolet à air comprimé pour les revêtements en phase solvant.

Les applications au pistolet à air comprimé s'effectuent généralement dans une enceinte à ambiance contrôlée en raison des émissions de solvants et des aérosols en excédent. Les dispositifs destinés à capter ces aérosols en excédent sont des filtres en tissu ou des rideaux d'eau, les déchets correspondants étant des filtres usagés ou des eaux usées provenant des laveurs.

Pour transformer le liant du revêtement en une surface dure, tenace et adhérente, on emploie différents procédés dont le séchage, la cuisson, le bombardement par faisceau d'électrons ou l'exposition à un rayonnement infrarouge ou ultraviolet. Ces procédés dégagent d'importantes quantités de COV provenant des revêtements en phase solvant et comportent en outre un risque d'explosion si les concentrations de solvants dépassent la limite inférieure d'explosivité (LIE). En conséquence, les installations de séchage et de cuisson sont dotées de dispositifs de dépollution de

l'air pour éliminer les émissions de COV ainsi que d'une protection contre les explosions.

Les préoccupations d'ordre environnemental et sanitaire, la sévérité accrue de la réglementation applicable aux formulations de revêtement classiques, le coût élevé des solvants et de l'élimination des déchets dangereux sont autant de facteurs qui ont suscité une demande en faveur de formulations contenant moins de composants dangereux et produisant moins de déchets à l'application. Ces formulations de substitution sont par exemple :

- les revêtements à haute teneur en matières solides, contenant deux fois autant de pigment et de résine dans un même volume de solvant que les revêtements classiques. Du fait de la moindre teneur en solvants, les émissions de COV à l'application se trouvent ainsi réduites de 62 à 85% par rapport aux revêtements classiques en phase solvant et à faible teneur en matières solides;
- les revêtements en phase aqueuse dont le véhicule est un mélange d'eau et de solvants organiques. Comparés aux revêtements en phase solvant, ils produisent entre 80 et 95% de moins d'émissions de COV et de solvants épuisés que les revêtements classiques;
- les revêtements en poudre, sans solvant organique, se composent de très fines particules de pigment et de résine. Ces poudres sont soit thermoplastiques (résine de poids moléculaire élevé pour revêtements épais), soit thermodurcissables (composés de faible poids moléculaire formant une fine couche avant réticulation).

#### Le nettoyage du matériel

Les procédés de revêtement impliquent des opérations régulières de nettoyage et d'entretien du matériel. Ces opérations produisent des quantités assez importantes de déchets dangereux, surtout si

l'on utilise des solvants halogénés pour le nettoyage. Classiquement, le nettoyage du matériel ayant servi aux revêtements en phase solvant s'effectue de manière manuelle, avec des solvants organiques. Les tuyauteries doivent être soumises à des purges successives au solvant jusqu'à ce qu'elles soient parfaitement propres. Le matériel servant à appliquer les revêtements doit être nettoyé chaque fois que l'on change de produit et que l'on arrête les fabrications. Le niveau de déchets produits par ces activités dépend des procédures et des pratiques retenues.

#### La gestion des déchets

Les procédés de revêtement engendrent plusieurs flux de déchets. Au nombre des déchets solides figurent les récipients ayant contenu des produits de revêtement, des boues de revêtements provenant des aérosols en excès et du nettoyage du matériel, des filtres usagés et des matières abrasives, des résidus de revêtements secs ainsi que des chiffons ayant servi au nettoyage.

Les effluents liquides comprennent les eaux usées provenant de la préparation des surfaces, les eaux de ruissellement entraînant les aérosols en excédent ou celles issues du nettoyage du matériel, les produits de revêtement non conformes ou en excédent ou encore les matières de préparation des surfaces, les déversements accidentels de liquide et les solutions de nettoyage épuisées. Avec la hausse des coûts d'élimination des déchets, le recyclage in situ en circuit fermé des solvants épuisés tend à être la solution de plus en plus souvent retenue. Les liquides à base d'eau sont généralement traités sur place avant d'être envoyés vers une station d'épuration publique.

Tous les procédés classiques utilisant des revêtements en phase solvant émettent des COV, ce qui implique la mise en place de dispositifs de lutte contre les émissions telles que des unités d'adsorption sur charbon actif, des condenseurs ou des équipements d'oxydation à catalyse thermique.

#### Références bibliographiques

Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), 1984: «Polynuclear aromatic compounds. Part 3: Industrial exposures in aluminium production, coal gasification, coke production, and iron and steel founding», *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, vol. 34 (Lyon).

Environmental Protection Agency (EPA), 1995: *Profile of the Nonferrous Metals Industry*, EPA/310-R-95-010 (Washington, DC).

Johnson A., Moira, C.Y., MacLean, L., Atkins, E., Dybuncio, A., Cheng, F. et Enarson, D., 1985: «Respiratory abnormalities amongst workers in an iron and steel foundry», *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 42, n° 2, pp. 94-100.

Kronenberg R.S., Levin, J.L., Dodson, R.F., Garcia, J.G. et Griffith, D.E., 1991: «Asbestos-related disease in employees of a steel mill and a glass bottle-manufacturing plant», *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 643, déc., pp. 397-403.

Landrigan, P.J., Cherniack, M.G., Lewis, F.A., Catlett, L.R. et Hornung, R.W., 1986: «Silicosis in a grey iron foundry. The persistence of an ancient disease», *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 12, n° 1, pp. 32-39.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1996: *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposures to Metalworking Fluids* (Cincinnati, Ohio).

Palheta, D. et Taylor, A., 1995: «Mercury in environmental and biological samples from a gold mining area in the Amazon Region of Brazil», *Science of the Total Environment*, vol. 168, n° 1, pp. 63-69.

Thomas, P.R. et Clarke, D., 1992: «Vibration white finger and Dupuytren's contracture: Are they re-

lated?», *Occupational Medicine*, vol. 42, n° 3, pp. 155-158.

#### Références complémentaires

Ameille, J., Dalphin, J.C. et Pairon, J.C., 2000: «Bronchopneumopathies chroniques obstructives professionnelles. Aspects médico-légaux, conduite à tenir en pratique», *Revue des maladies respiratoires*, vol. 17, n° 5, pp. 915-922.

American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH) Committee on Industrial Ventilation, 1992: *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice*, 22<sup>e</sup> édition (Cincinnati, Ohio).

American National Standards Institute (ANSI), 1976: *Safety Requirements for the Construction, Care, and Use of Lathes*, ANSI B11.6-1976 (New York).

— 1988: *The Use, Care, and Protection of Abrasive Wheels*, ANSI B7.1-1988 (New York).

— 1988: *Safety in Welding and Cutting*, ANSI Z49.1-1988 (New York).

American Petroleum Institute (API), 1971: *Chemistry and Petroleum for Classroom Use in Chemistry Courses* (Washington, DC).

— 1980: *Facts about Oil*, Manual 4200 (Washington, DC).

— 1984: *Safe Operation of Inland Bulk Plants*, Publication 2008 (Washington, DC).

Antoni, H., 1978: «Massnahmen zu höherer Sicherheit beim Spannen mit Backenfutterm», *Zeitschrift für industrielle Fertigung*, n° 10, pp. 611-615.

Bernard, A., Hermans, C., Broeckaert, F. et Robin, M., 2000: «Les dioxines», *Médecine du travail et ergonomie* (Belgique), vol. 37, n° 1, pp. 13-17.

Bouvier, H., Gautret de la Moricière, G., Quang, X.L., Mahieu, J.C., Muiras, J.M. et Perrin, P., 2000: *At-*

*liers de traitement de surface. Concevoir en sécurité intégrée. Création, extension, modification* (Paris, Institut national de recherche et de sécurité (INRS)).

Buonicore, A.J. et Davis, W.T. (directeurs de publication), 1992: *Air Pollution Engineering Manual* (New York, Van Nostrand Reinhold, Air and Waste Management Association).

Burgess, W.A., 1995: *Recognition of Health Hazards in Industry*, 2<sup>e</sup> édition (New York, John Wiley & Sons).

Collinge, C., Lemay, E., Wojtowicki, J.L., Tellier, C., Benoît, R., Charron, F., Gauthier, F., Nicolas, J. et Perrault, G., 1998: *Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde*, R-186 (Montréal, Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSSST)).

Crinquand, A., Boudret, G., Laureillard, J., Joly, N., Gillet, A., Iwatsubo, Y., Brochard, P., Choudat, D. et Ameille, J., 1997: «Etude de la morbidité respiratoire de polisseurs de métaux exposés à des poussières de fer cristallin», *Archives des maladies professionnelles et de médecine du travail*, vol. 58, n° 8, pp. 648-653.

D'Hertefelt, H., Bentein, K. et Wilcox, M., 1996: «Ebarbage manuel des jantes», dans *Le corps au travail. Pratiques ergonomiques dans l'entreprise* (Bruxelles, Institut national de recherche sur les conditions de travail (INRCT)).

— 1996: «Vibrations lors de l'utilisation de meuleuses portatives», dans *Le corps au travail. Pratiques ergonomiques dans l'entreprise*, *ibid.*

Exxon Company, 1987: *Encyclopedia for the User of Petroleum Products*, Marketing Technical Services (Houston, Texas).

Goldsmith, A.H., Vorpahl, K.W., French, K.A., Jordan, P.T. et Jurinski, N.B., 1976: «Health hazards from oil, soot and metals at a hot forging operation»,



- American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 37, n° 4, pp. 217-226.
- Gulf Publishing Company, 1964: *Petroleum Marketing and Transportation, 1964* (Houston, Texas).
- Harten, G.A., 1976: «Een nieuwe, ergonomisch verbeterde draaibank», *Tijdschrift voor sociale geneeskunde* (Amstelveen, Pays-Bas), vol. 54, n° 17, pp. 575-578.
- Héce, G., 1999: *Soudage et coupage au chalumeau. Conseils d'utilisation* (Paris, Institut national de recherche et de sécurité (INRS)).
- Kusiak, R.A., Springer, J., Ritchie, A.C. et Muller, J., 1991: «Carcinoma of the lung in Ontario gold miners: Possible aetiological factors», *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 48, n° 12, pp. 808-817.
- Laville, F., Thomas, M. et Beauchamp, Y., 1998: *Réduction du bruit occasionné par les opérations d'ébarbage de pièces d'aluminium coulées*, R-177 (Montréal, Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST)).
- Ligue contre le cancer, 2001: *Cancers d'origine professionnelle. Comment les repérer, les déclarer, les faire connaître, les faire indemniser* (Paris, ministère de l'Emploi et de la Solidarité).
- Mauge, M. et Lupin, H., 1997: *Fraiseuses. Machines à fraiser*, Fiche technique de sécurité Ed 584 (Paris, Institut national de recherche et de sécurité (INRS)).
- Mobil Oil Corporation, 1990: «Handling, storing and dispensing industrial lubricants», *Mobil Technical Bulletin* (Fairfax, Virginia).
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1975: *Ventilation Requirements for Grinding, Buffing and Polishing Operations*, NIOSH Publication No. 75-105 (Cincinnati, Ohio).
- National Safety Council, 1995: *Petroleum Section Safety and Health Fact Sheets, 1988-95* (Itasca, Illinois).
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 1979: *Prudent Practices for Controlling Lead Exposure in the Secondary Lead Smelting Industry: A Guide for Employers and Employees* (Washington, DC).
- . 1982: *Cooperative Assessment Program Manual for the Secondary Lead Smelting Industry* (Washington, DC).
- . 1984: *Cooperative Assessment Program Manual for the Battery Manufacturing Industry* (Washington, DC).
- Ontario Metal Finishing Industry Pollution Prevention Project, 1995: *Metal Finishing Pollution Prevention Guide* (Ottawa, Environment Canada, Water Technology International, Sheridan Environmental Technology Institute).
- Pérusse, M., 1996: «L'implication de la direction: un prérequis indispensable», *Travail et santé* (Canada), vol. 12, n° 4, pp. 11-15.
- Simonato, L., Moulin, J.J., Javelaud, B., Ferro, G., Wild, P., Winkelmann, R. et Saracci, R., 1994: «A retrospective mortality study of workers exposed to arsenic in a gold mine and refinery in France», *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 25, n° 5, pp. 625-633.
- Tellier, C., Jaime, L. et Daigle, R., 1999: *La sélection et le développement de gants de protection contre les lacerations dans le secteur de la fabrication des produits en métal*, R-234 (Montréal, Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST)).
- Travail et sécurité*, 1997: «Formation du personnel. Tirs en masses chaudes, à l'aide d'explosifs», n° 566, nov., pp. 50-51.