

Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour la fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc

Les Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (Directives EHS) sont des documents de références techniques qui présentent des exemples de bonnes pratiques internationales, de portée générale ou concernant une branche d'activité particulière¹ Lorsqu'un ou plusieurs États membres participent à un projet du Groupe de la Banque mondiale, les Directives EHS doivent être suivies conformément aux politiques et normes de ces pays. Les Directives EHS établies pour les différentes branches d'activité sont conçues pour être utilisées conjointement avec les **Directives EHS générales**, qui présentent des principes directeurs environnementaux, sanitaires et sécuritaires applicables dans tous les domaines. Les projets complexes peuvent exiger l'application de plusieurs directives couvrant des branches d'activité différentes. La liste complète de ces directives figure à l'adresse suivante :

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

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

spécifiques à chaque site et l'établissement d'un calendrier adapté pour atteindre ces objectifs.

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

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

Champ d'application

Les Directives EHS pour la fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc portent sur les activités communes aux

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

nombreuses industries intervenant dans la fabrication de ces pièces. Elles ne portent pas sur l'extraction et la production des matières premières (métaux, matières plastiques et caoutchouc), la coulée des métaux et la synthèse des polymères thermoplastiques ou additifs. L'Annexe A décrit en détail cette branche d'activité.

Ce document se compose des sections ci-après :

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

1.0 Description et gestion des impacts propres aux activités considérées

Cette section résume les questions d'ordre environnemental, sanitaire et sécuritaire qui peuvent se poser durant la phase opérationnelle des activités de fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc, ainsi que des recommandations concernant leur gestion. Les recommandations relatives à la gestion des questions communes à la plupart des projets de grande envergure figurent dans les **Directives EHS générales**.

1.1 Environnement

1.1.1 Métaux

Les principaux problèmes environnementaux associés à la fabrication de pièces métalliques rentrent dans les catégories suivantes :

- Émissions atmosphériques
- Eaux usées et déchets liquides
- Déchets solides

Émissions atmosphériques

Le Tableau 1 indique les types d'émissions atmosphériques généralement liées à la fabrication de métaux. Le frittage peut entraîner la formation de sous-produits de combustion et de gaz à effet de serre en raison de l'énergie consommée. Les oxydes, poussières et lubrifiants (cires ou graphite) utilisés dans les charges d'alimentation avant le compactage peuvent contenir des composés organiques et inorganiques volatils. Les manipulations de particules métalliques microscopiques (environ 1 µm de diamètre) peuvent produire des poussières métalliques. Les émissions produites par la coulée des métaux sont examinées dans les **Directives EHS pour les fonderies**.

Les émissions atmosphériques produites par les procédés de formage peuvent provenir des solvants et solutions refroidissantes / lubrifiantes utilisées au niveau des machines et équipements, auxquelles s'ajoutent les vapeurs de lavage provenant du refroidissement (après le formage à chaud ou anodisation), ou condensation et vapeurs d'huile et de graisse produites par les outils mécaniques automatisés.

Les traitements thermiques effectués pour le recuit et la trempe produisent des émissions dans les fours (sous-produits de combustion et émissions produites par la combustion des huiles et des graisses présentes à la surface des métaux), ainsi que dans le bain de trempe (eau mélangée avec des additifs chimiques ou des huiles synthétiques), telles que vapeurs ou condensation.

Durant le soudage, les émissions atmosphériques dépendent du matériau de base à souder et du procédé utilisé. Plus particulièrement, le bain de fusion, les gaz de protection, la réaction à l'air libre de la partie extérieure des électrodes fourrées, et la combustion des huiles et graisses présentes sur la matière brute peuvent produire des émissions. On portera une attention particulière aux émissions produites par le revêtement final du métal de base.

Tableau 1 – Émissions atmosphériques produites par la fabrication de pièces métalliques

Procédé	Émissions
Frittage	Poussières libres, particules, monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, composés chlorure et fluorure, COV (vapeurs de polystyrène, hydrocarbures), fumées métalliques (dégagement gazeux de métal et d'oxydes de métal)
Formage du métal	
Découpage, meulage ou formage du métal (forgeage, tréfilage, pressage, poinçonnage, etc.)	Fumées et brouillard liquide [lorsque les liquides de coupe/ lubrification/ refroidissement sont chauffés (pour le tréfilage, par exemple)]. En cas de travail à chaud ou d'effet d'usure important, certains lubrifiants peuvent se décomposer et produire des COV.
Traitements thermiques	
Trempe, recuit et autres traitements généraux	Brouillard/COV/solvants, fumées, particules (vapeurs oxydées de chrome ou de nickel)
Préparation de surface	
Traitements abrasifs (grenailage, sablage)	Poussières de particules abrasives, de métaux et d'oxydes métalliques
Dégraissage aux solvants ou par émulsion, dégraissage alcalin et nettoyage acide	Solvants (uniquement pour le dégraissage aux solvants et par émulsion), COV, fumées, vapeurs acides ou alcalines contenant de l'ammoniac ou du chlorure d'ammonium
Soudage	Particules, vapeurs oxydées de chrome (VI) et de nickel, ozone, vapeurs (métaux ou oxydes) de plomb, cadmium, zinc, étain, fer, molybdène, manganèse, cobalt, vanadium, silice et silicates, fluorures, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, phosgène (chlorure de carbonyle), phosphine
Finissage superficiel	
Anodisation, revêtement avec conversion chimique, galvanoplastie	Brouillard contenant des ions métalliques et brouillard chimique, acide chlorhydrique, acide sulfurique, ammoniac, chlorure d'ammonium, oxyde de zinc, particules, plomb, cuivre, chlore
Peinturage	Solvants
Autres techniques de traitement des surfaces métalliques (polissage, revêtement à chaud et décapage)	Fumées métalliques et acides, oxyde de zinc (formé dans le refroidissement à l'eau), COV, oxydes d'azote, particules, oxyde de soufre (formé dans le bain chaud de galvanisation)

Les émissions produites par le nettoyage des surfaces métalliques sont liées à l'évaporation des substances chimiques durant le dégraissage, le nettoyage et le rinçage. Le sablage et le meulage de surfaces sèches peuvent produire des émissions particulières contenant des particules métalliques et des oxydes métalliques.

Les traitements électrochimiques produisent à la surface des fluides chauffés des émissions atmosphériques, des brouillards et des bulles de gaz pouvant contenir des métaux et autres substances présentes dans le bain. Durant le peinturage, les sources d'émissions sont essentiellement les solvants organiques de support. Il se produit également des émissions durant l'entreposage, le mélange, l'application et le séchage.

Composés organiques volatils (COV)

Les stratégies recommandées pour gérer les émissions de COV consistent, notamment, à :

- installer des serpentins refroidisseurs (ou serpentins supplémentaires) au-dessus de la zone de dégraissage à la vapeur ;
- établir un courant d'air au-dessus du dispositif de dégraissage (pas plus de 40 m / minute) ;
- assurer la rotation des pièces avant de les retirer du dispositif de dégraissage à la vapeur, avec notamment :
 - installation de thermostats sur les réservoirs et cuves de solvants ;
 - installation de filtres en ligne pour éviter l'accumulation de particules
 - récupération des solvants pour réduire les émissions de COV dans les étuves à durcir
 - utilisation de charbon activé pour récupérer les vapeurs de solvant
- nettoyer correctement les surfaces métalliques pour réduire les émissions durant le soudage et le revêtement ;

- éliminer les revêtements du métal de base avant le soudage, en utilisant si possible un procédé de nettoyage mécanique (par ex., projection de sablage au CO₂) plutôt que des solvants.

Poussières

Les recommandations afin de gérer ces émissions consistent, notamment, à :

- installer des aspirateurs en ligne munis de filtres ou d'épurateurs. On peut également utiliser des électrofiltres ;
- maintenir si possible la surface du métal humide pour éviter ou réduire la production de poussière.

Teneur en acides / métaux des brouillards et fumées

Les stratégies de gestion recommandées pour réduire la teneur en acides / métaux des émissions de brouillards et fumées consistent, notamment, à :

- utiliser des additifs supprimant les fumées dans les bains électrolytiques pour réduire les émissions atmosphériques des métaux galvanisés (comme le chrome) ;
- installer des aspirateurs en lignes munis de filtres pour éliminer les composés acides ;
- pour réduire la pollution causée par les métaux ou les oxydes métalliques, installer des filtres appropriés pour les métaux complexes ;
- réduire les vapeurs de soudure (mélange de métaux, d'oxydes et de fumées produites par la combustion d'huile) en éliminant le revêtement des métaux de base. Ne pas utiliser pour cela de solvants à base d'hydrocarbures chlorés, pour éviter la formation de phosgène.

Eaux usées et déchets liquides

Les principaux rejets d'eaux usées liés à la fabrication de pièces métalliques sont les suivants : eau de nettoyage et de rinçage ;

eau de refroidissement ; autres agents nettoyants ; eaux usées produites par les activités de découpage, de sablage, d'ébavurage et de finissage ; et les opérations de travail des métaux avec des fluides aqueux. Le tableau 2 décrit les rejets d'eaux usées inhérents aux procédés de fabrication de pièces métalliques.

Tableau 2 – Déchets liquides produits par la fabrication de pièces métalliques	
Procédé	Eaux usées
Frittage	Oxydes métalliques, phénols, graisses, huiles déversées, solides et métaux en suspension et en solution (boues métalliques)
Formage du métal	
Découpage, meulage ou formage du métal	Déchets liquides d'usinage (éthylène glycol, fluides à base d'huile ; émulsions huile eau, émulsions synthétiques et déchets acides (chlorhydrique, sulfurique, nitrique), alcalins et de solvants
Préparation de surface	
Dégraissage aux solvants ou par émulsion, dégraissage alcalin et nettoyage acide	Surfactants, émulseurs, détergents, terpènes, déchets alcalins ou acides, sels métalliques, matériaux de base dissous
Soudage	Bain de refroidissement contaminé utilisé pour la trempe après le soudage
Finissage superficiel	
Anodisation, revêtement avec conversion chimique, galvanoplastie	Déchets acides / alcalins, métaux, sels métalliques, zinc, chrome (VI), cyanure
Peinturage	Déchets de solvants, déversements et résidus
Autres techniques de traitement des surfaces métalliques (polissage, revêtement à chaud et décapage)	Déchets métalliques (zinc, chrome [VI]) et acides ou alcalins

Le traitement thermique et le travail à chaud, notamment le soudage, peuvent être suivis d'un refroidissement rapide dans un liquide. Le refroidissement est également important pour le coulage et le frittage. On trouvera des renseignements complémentaires sur le coulage dans les **Directives EHS pour**

les fonderies. Le métal est généralement refroidi dans un bain d'eau ou à base d'eau qui peut également contenir des additifs chimiques (solvants organiques, phénols, huiles et graisses). Le bain de trempe usé peut contenir des résidus d'additifs et leurs produits secondaires, des solides en suspension et des crasses métalliques (oxydes formés durant la solidification).

Les laveurs utilisés pour épurer les fumées peuvent produire des déchets liquides contenant des métaux et des phénols. Ces déchets sont généralement très alcalins ou acides et doivent être neutralisés avant d'être évacués. Pour éviter le risque de pollution thermique par l'évacuation des eaux de refroidissement sans contact, il est recommandé d'utiliser un système de refroidissement/recyclage (tour de refroidissement, par exemple).

Les fluides résultant du découpage, du meulage et du formage du métal sont généralement contaminés après un certain nombre d'utilisations. Les fluides d'usinage peuvent être des fluides à base de pétrole, des émulsions huile-eau ou des émulsions synthétiques. Les fluides peuvent se décomposer à force d'être réutilisés, et les liquides usés peuvent contenir différents composés provenant dans certains cas de la combinaison de métaux et oxydes métalliques avec les composants fluides dégradés. Les fluides usés peuvent contenir un grand volume de métaux (fer, aluminium, cuivre, etc.), de substances acides et alcalines (acides chlorhydrique, sulfurique et nitrique) et de substances organiques (éthylène glycol, acétaldéhyde et formaldéhyde, émulsions de coupe, huiles solubles, fluides semi-synthétiques et déchets de solvants).

Les activités de nettoyage pour la préparation de surface peuvent générer des déchets liquides (surtout au rinçage). Les agents de lavage sont des produits chimiques à base d'eau qui peuvent être classés en deux grandes catégories : produits acides et produits alcalins. Ces deux types de produits aqueux contiennent des surfactants (agents de surface), des émulseurs

(pour éliminer l'huile), des détergents et des terpènes (dans le cas des agents de lavage semi-aqueux). Les déchets aqueux provenant du nettoyage alcalin et acide, qui ne contiennent pas de solvants, peuvent être traités sur place.

Les techniques de revêtement à chaud (galvanisation) utilisent de l'eau pour le rinçage après le prétraitement de nettoyage et pour le refroidissement après le revêtement. L'immersion à chaud produit des déchets solides – des crasses composées d'oxyde qui sont régulièrement écumées à la surface de la cuve chauffée. Ces opérations peuvent produire des déchets liquides contenant des métaux. Les bains de morsure comprennent des acides forts (acide nitrique) ou des bases. On utilise des sels (persulfate d'ammonium, chlorure ferrique) pour préparer la solution de morsure. La solution usée peut contenir des métaux et des acides. La galvanisation et les déchets connexes représentent le plus grand volume de déchets contenant des métaux (cadmium, chrome, cuivre, plomb et nickel) et du cyanure.

Les activités de peinture produisent des déchets contenant des solvants, parallèlement aux solvants qui sont directement libérés (benzène, éthyl méthyl cétone, méthyl isobutyl cétone, toluène et xylènes). Il faut également nettoyer les conteneurs utilisés pour la peinture et les débordements en cas de peinture au pistolet, ainsi que la peinture excédentaire ou périmée, ce qui produit aussi des déchets liquides.

Les activités d'anodisation peuvent produire des déchets liquides contenant de l'acétate de nickel et des produits d'impression sans nickel. Parmi les autres polluants figurent les agents complexants et les métaux qui peuvent être combinés avec d'autres déchets liquides de traitement de finition et traités sur place par la méthode conventionnelle de précipitation des hydroxydes. Les eaux usées contenant du chrome (celles produites dans le revêtement avec conversion chimique, par exemple) doivent être prétraitées pour réduire le chrome

hexavalent en chrome trivalent. Le traitement conventionnel produit des boues qui sont envoyées à l'extérieur aux fins de récupération ou d'évacuation des métaux.

Les effluents contiennent un grand volume de polluants et peuvent être séparés comme suit : eaux usées susceptibles de contenir des huiles et des solvants ; déchets liquides de traitement de surface/finissage ; et eaux usées contenant des métaux. Les mesures de prévention de la pollution et de dépollution appropriées consistent, notamment, à :

Pour les effluents à base d'huile :

- séparer les effluents des eaux usées et prendre des mesures spéciales d'évacuation si le recyclage n'est pas possible ;
- normaliser les différents types d'huile utilisés et planifier systématiquement les procédés utilisant différents types d'huile ;
- prolonger la durée de vie du liquide de refroidissement en utilisant des décanteuses, en procédant à des analyses périodiques, en utilisant des biocides et l'ultrafiltration et en éliminant les huiles au moyen d'écumeurs à disques ou à bande. Utiliser des méthodes d'entretien appropriées pour éviter la pollution des huiles de coupe par les solvants ;
- recycler les bains de trempage à l'huile en filtrant les métaux ;
- récupérer les fluides d'usinage dans un bac récepteur placé sous les machines ;
- pour le formage à froid et les autres procédés utilisant de l'huile, utiliser des dispositifs de graissage automatique pour réduire l'accumulation de graisses. Envisager d'utiliser un lubrifiant pour l'emboutissage, adapté à des conditions permettant le traitement thermique.

Pour les effluents à base de solvants et d'eau :

- manipuler les solvants avec soin pour éviter les déversements et les fuites. On trouvera des conseils d'entreposage et de manipulation des solvants dans les **Directives EHS générales** ;
- utiliser de préférence des agents de dégraissage moins dangereux (solvant pétrolier, détergent végétal, CO₂ supercritique ou lavage alcalin), en plus du lavage par solvant à contre-courant (en deux stades : nettoyage avec le solvant sale, puis avec le solvant propre) ; utiliser si possible une solution aqueuse alcaline ne contenant pas de COV pour nettoyer le métal. Certaines solutions de nettoyage peuvent être régénérées par microfiltration ;
- recycler sur place les solvants de dégraissage usés en réutilisant les appareils de distillation continue et les solvants dérivés de déchets ;
- nettoyer à froid avec des essences minérales recyclées avant le dégraissage final à la vapeur ;
- récupérer par évaporation les acides contenus dans les eaux usées ;
- réduire la pollution par entraînement dans l'eau de rinçage en optimisant le fonctionnement des pièces au moyen de surfactants et autres agents mouillants ;
- utiliser si possible des techniques de nettoyage mécanique et non chimique (pour le laiton, par exemple, vibro-abrasion plutôt que décapage aux acides ; pour éliminer les oxydes de titane, grattage mécanique plutôt que solution acide ; et pour nettoyer des feuilles de cuivre, machine à brosse rotative et ponce) ;
- contrôler et réduire les concentrations d'ions métalliques dissous (par ex., réduction de la concentration de molybdène par osmose inverse / précipitation ; solutions non chromatées pour le décapage alcalin de l'aluminium ouvré ; bain d'acide sulfurique / peroxyde d'hydrogène au

lieu d'un bain de cyanure / acide chromique pour le décapage brillant du cuivre) ;

- remplacer de préférence les solutions de décapage aux acides ou aux alcalins par d'autres agents nettoyants (par ex., détergent biodégradable pour fil caustique et alcools à chaîne linéaire au lieu d'acide sulfurique pour décaper les fils de cuivre, à condition de prendre des mesures adéquates de sécurité et de prévention des incendies) ;
- installer des réducteurs de débit / compteurs et utiliser une pompe à pied (ou un photodétecteur pour les lignes automatiques) pour déclencher le rinçage ;
- traiter et recycler les déchets industriels liquides par permutation d'ions, osmose inverse, électrolyse et électrodialyse avec permutation d'ions.

Pour les déchets liquides de traitement de surface / finissage

- utiliser des produits moins dangereux que les agents complexants forts comme l'EDTA et les surfactants toxiques comme l'ENP et le PFOS ;
- régénérer les bains de moirure anodiques et alcalins en récupérant les sels métalliques (d'aluminium, par ex.) aluminium) par électrolyse de l'aluminate de sodium ;
- limiter les stocks de matériau de finition ayant une faible durée de conservation ;
- minimiser la production d'eaux usées par les travaux de peinture (clair à foncé) et le choix des techniques de pulvérisation (par ex., utiliser un pistolet pour les applications de particules et un dispositif de finition électrostatique au lieu d'un pulvérisateur pneumatique conventionnel) ;
- au lieu de solvants chlorés (notamment tétrachlorure de carbone, chlorure de méthylène, 1,1,1-trichloroéthane et perchloroéthylène), utiliser des solvants non toxiques ou moins toxiques comme agents nettoyants ;
- utiliser des détergents non fumants et moins toxiques que l'acide chromique et le phosphate trisodique (comme l'acide sulfurique et le peroxyde d'hydrogène) et de l'ammoniac au lieu d'agents nettoyants au cyanure ;
- utiliser des produits pour bain moins toxiques (par ex., zinc au lieu de cadmium dans les solutions salines alcalines ; acide nitrique ou chlorhydrique au lieu de cyanure pour certains bains galvanoplastiques ; chlorure de zinc au lieu de cyanure de zinc) ;
- installer des égouttoirs, des ramasse-gouttes et des bassins de reprise après les bains de traitement.

Pour les métaux contenus dans les eaux usées :

- bien gérer la consommation d'eau car cela réduit l'utilisation de matières premières et le gaspillage. En outre, la régulation des procédés et la réduction des pertes par entraînement sont essentielles pour réduire la consommation de matières premières dangereuses ;
- séparer les eaux usées contenant des métaux récupérables des autres déchets liquides. Les métaux doivent être extraits de la solution (dans une cuve d'électrolyse ou par précipitation des hydroxydes) ;
- faire subir une électrolyse continue aux eaux usées de décapage des métaux pour régénérer et récupérer les métaux ;
- récupérer les métaux plongés dans une solution de décapage brillant par un procédé approprié (permutation d'ions pour le cuivre, ou séparation des phosphates pour le traitement des alliages d'aluminium) ;
- utiliser des solutions en lit fluidisé d'azote et de corindon au lieu de solutions contenant des cyanures sous forme de sel (pour le durcissement, par exemple) ;
- éviter le placage au chrome hexavalent, sinon utiliser des circuits fermés et des cuves hermétiques pour réduire les émissions.

Traitement des eaux usées industrielles

La fabrication générale de pièces en métal, plastique et caoutchouc faisant appel à un large éventail de matières premières, substances chimiques et procédés, les méthodes de traitement des eaux usées dépendent du procédé de fabrication utilisé.

Les techniques de traitement des déchets liquides de cette branche d'activité sont la séparation à la source et le prétraitement des flux concentrés d'eaux usées. Le traitement des eaux usées comprend généralement les étapes suivantes : boîtes à graisse, récupérateurs, aérofloculation ou séparation eau/hydrocarbures pour séparer les huiles et les matières flottantes ; filtration pour séparer les matières filtrables ; équilibrage de débit et de charge ; sédimentation pour réduire les matières solides en suspension à l'aide d'un clarificateur ; traitement biologique, généralement aérobique, pour réduire les matières organiques solubles (DBO) ; élimination des nutriments biologiques pour réduire la teneur en azote et phosphore ; chloration des effluents devant être désinfectés ; déshydratation et évacuation des résidus dans des décharges pour déchets dangereux. Des installations techniques additionnelles peuvent s'avérer nécessaires pour : i) le confinement et le traitement des matières organiques volatiles extraites aux différents stades du traitement des eaux usées ; ii) technique avancée d'élimination des métaux par filtration sur membrane ou autre traitement physico-chimique ; iii) élimination des matières organiques récalcitrantes par oxydation chimique avancée ou sur charbon activé ; iv) élimination des couleurs résiduelles par adsorption ou oxydation chimique ; v) réduction de la toxicité des effluents au moyen d'une technologie appropriée (osmose inverse, permutation d'ions, charbon activé, etc.) ; vi) réduction de la teneur totale des effluents en matières dissoutes par osmose inverse ou évaporation ; et vii) confinement et neutralisation des odeurs nuisibles.

La gestion des déchets industriels liquides est examinée dans les **Directives EHS générales**, accompagnée d'exemples de techniques de traitement. L'application de ces techniques et de bonnes méthodes de gestion des eaux usées doivent permettre aux installations d'atteindre les valeurs de référence pour l'évacuation des eaux usées indiquées au tableau correspondant de la Section 2 du présent document.

Autres déchets liquides et consommation d'eau

Les directives sur la gestion des eaux usées non contaminées provenant des équipements sanitaires, des eaux de pluies non contaminées et des eaux d'égout sont présentées dans les **Directives EHS générales**. Les eaux polluées (eaux de ruissellement des aires d'entreposage de déchets solides (chutes métalliques, par ex.) exposées à l'air libre doivent être acheminées de manière à passer par le système de traitement des eaux usées industrielles. Des recommandations pour réduire la consommation d'eau, en particulier dans les sites où les ressources naturelles en eau sont limitées, sont fournies dans les **Directives EHS Générales**.

Déchets solides

La fabrication de pièces métalliques et les opérations connexes (traitement des eaux usées ou réduction des fumées) peuvent produire des déchets solides. Le tableau 3 décrit les principaux déchets solides produits par la fabrication de pièces métalliques et leur source.

Le frittage produit un petit volume de déchets solides, essentiellement durant l'entreposage et la manipulation des matières premières (particules, poudres et pollution du sol par les déversements accidentels d'hydrocarbures). Les traitements thermiques (recuit, par exemple) produisent une accumulation d'oxydes. Des boues métalliques peuvent également se déposer lors du nettoyage des bains de trempe ou de refroidissement.

Le formage des métaux produit un grand volume de copeaux métalliques (ferrailles), des boues métalliques dans le liquide de coupe et des résidus de distillation des solvants. Les ferrailles contiennent essentiellement les rognures provenant de la pièce intermédiaire (acier, par exemple) et peuvent être combinées avec un faible volume de fluides de façonnage (liquides de refroidissement ou lubrifiants) utilisés avant et pendant le formage. Ces ferrailles sont généralement réutilisées comme charge d'alimentation. Les scories, poussières et poudres de soudage peuvent contenir des oxydes métalliques qui dépendent des métaux de base utilisés et de leur revêtement.

La préparation de surface produit des déchets solides (boues de traitement des eaux usées, résidus de distillation, résidus des cuves de nettoyage, résidus des fluides d'usinage).

L'anodisation, le revêtement avec conversion chimique, la galvanoplastie et le peinturage peuvent produire des solutions et des eaux usées dont le traitement peut entraîner la formation de boues, de métaux de base, d'oxydes métalliques et de diverses substances réactives. Le polissage, le revêtement à chaud, le décapage et les autres techniques de finissage produisent les mêmes déchets que l'anodisation, mais aussi des boues de polissage, des écumes dans le bain de galvanisation à chaud et des boues de décapage.

Les mesures de prévention de la pollution et de dépollution recommandées consistent, notamment, à :

- séparer les poussières et débris métalliques par type de métal pour faciliter la récupération et le recyclage ;
- réduire et traiter les scories formées durant le soudage, le forgeage, l'usinage et le finissage mécanique, car elles peuvent contenir des ions métalliques ;
- préparer les métaux enlevés des eaux usées aux fins de récupération ou d'évacuation ;
- évacuer les boues produites durant le finissage superficiel (galvanisation, peinture, revêtement à chaud).
- s'il n'est pas possible de réutiliser ou recycler les déchets, évacuer ceux-ci conformément aux recommandations relatives à la gestion des déchets formulées dans les **Directives EHS générales**.

1.1.2 Plastiques et caoutchoucs

Les principaux problèmes environnementaux liés à la fabrication de produits en matière plastique et en caoutchouc rentrent dans les catégories suivantes :

- Émissions atmosphériques

Tableau 3 – Déchets solides produits par la fabrication de pièces métalliques	
Procédé	Déchet solide
Frittage	Particules, poudres provenant des opérations suivantes :
Façonnage	
Découpage, meulage et mise en forme	Particules métalliques (limaille de fer, copeaux formés durant les opérations d'usinage), boues d'usinage contenant du métal et résidus de distillation de solvants
Préparation de surface	
Dégraissage aux solvants ou par émulsion, dégraissage alcalin et nettoyage acide	Boues de traitement
Soudage (y compris à passes multiples)	Oxydes métalliques (oxydes de Ti, Al, Fe, Ni, Cr, Cu, Zn ou Sn) et scories
Finissage superficiel	
Anodisation, revêtement avec conversion chimique, galvanoplastie	Boues métalliques, métal de base et substances réactives
Peinturage	Résidus de distillation, boues séchées, peinture et métaux
Autres techniques de traitement des surfaces métalliques (polissage, revêtement à chaud et décapage)	Boues de polissage, écumes (zinc, chrome), boues de décapage, écumes d'oxyde, boues métalliques

- Eaux usées
- Déchets solides

Les activités susceptibles d'avoir des effets nocifs sur l'environnement sont la granulation, le mélangeage / préparation de résines, le façonnage et le finissage. Étant donné que les principales différences de procédé de fabrication des produits en plastique et en caoutchouc se situent au niveau du mélangeage/compoundage, de la préparation et du façonnage, ces procédés sont présentés séparément. En revanche, compte tenu de la similarité des opérations de granulation et de finissage intervenant dans la fabrication des thermoplastiques ainsi que des polymères et caoutchoucs thermodurcissables, celles-ci sont examinées ensemble dans le présent document.

Émissions atmosphériques

Plastiques

Les émissions atmosphériques peuvent contenir des matières particulaires et des composés organiques volatils (COV). Les matières particulaires peuvent être libérées durant la manipulation des additifs secs et la granulation des polymères. En outre, le chauffage des thermoplastiques durant le compoundage et le formage peut entraîner la formation et la libération d'aérosols fins.

Les mesures de prévention et de maîtrise des émissions de particules recommandées consistent, notamment, à :

- optimiser les conditions de manipulation et de mélangeage des additifs secs, la température et la granulation des polymères ;
- filtrer l'air évacué dans les aires de manutention et de granulation des matériaux au moyen d'un cyclone ou d'un filtre à manches ;
- capturer et réduire les émissions fugitives des appareils de production, généralement au moyen d'un cyclone primaire

et d'un filtre à sacs ou d'un dépoussiéreur électrique secondaire.

Les opérations de compoundage et de formage peuvent produire des COV tels que des additifs et solvants à faible poids moléculaire, surtout lorsqu'elles sont effectuées à chaud. Durant le formage des plastiques non réactifs, les polymères de base sont stables bien au-delà des températures de traitement requises, à quelques exceptions près. De la vapeur d'eau, des additifs à faible température d'ébullition et des monomères piégés dans les polymères peuvent cependant être libérés, en particulier au point le plus chaud de la chaîne de traitement. Le tableau 4 présente des exemples de plastiques courants et certains des composés détectés dans les émanations produites lorsque le plastique est traité ou chauffé à des températures supérieures au plafond recommandé. Dans la fabrication des

Tableau 4 – Substances pouvant être libérées à des températures de traitement élevées

Plastiques	Exemples de composés détectés
PVC – Polychlorure de vinyle	Chlorure d'hydrogène, chlorure de vinyle
ABS – Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (copolymère)	Styrène, phénol, butadiène
PP - Polypropylène	Aldéhydes, butane, autres alcanes, alcènes
POM - Acétals	Formaldéhyde
LDPE, MDPE, HDPE Polyéthylène (densité faible, moyenne et élevée)	Aldéhydes, butane, autres alcanes, alcènes
PS - Polystyrène	Styrène, aldéhydes
PET - Polyéthylène téréphtalate	Formaldéhyde, méthoxy benzène, benzaldéhyde et divers COV

polystyrènes expansibles (PSE), contrairement aux thermoplastiques, la matière première doit subir un traitement préalable avant le moulage final. Dans le procédé de conversion, un petit volume de liquide à faible température

d'ébullition (généralement un mélange d'isomères du pentane, 3 à 8 % en poids) est utilisé comme agent d'expansion².

Les mesures de prévention et de maîtrise des émissions de COV recommandées consistent, notamment, à :

- entreposer tous les solvants et agents nettoyants liquides dans un espace clos, de même que tous les réactifs à faible température d'ébullition ;
- installer des dispositifs de contrôle de la ventilation, notamment aux points les plus chauds de la chaîne de traitement ;
- installer des extracteurs d'air et des appareils d'adsorption sur charbon activé ;
- installer des oxydeurs thermiques de récupération / régénération, des oxydeurs catalytiques de régénération, des condenseurs ou des filtres biologiques ;
- formuler et mettre en œuvre un plan de gestion des solvants.

Caoutchoucs

Des émissions fugitives d'additifs chimiques peuvent être produites dans l'aire de mélangeage. Lors du prédosage des additifs, les substances chimiques entreposées à découvert peuvent produire d'importantes émissions fugitives de poussière. Il peut également y avoir des émissions fugitives lorsque les substances chimiques sont chargées dans le mélangeur. Enfin, le surfaçage peut aussi produire des émissions de particules.

Les mesures de prévention et de maîtrise des émissions de poussière et de particules recommandées consistent, notamment, à :

- utiliser des substances chimiques emballées dans de petits sacs plombés prédosés qui sont directement versés dans le mélangeur de façon à limiter la production de poussière ;
- contrôler les émissions des mélangeurs internes au moyen de filtres à sacs. Les émanations des hottes aspirantes doivent être dirigées vers les filtres à sacs pour réduire les émissions de particules, notamment celles de composés semi-volatils³, d'ammoniac, et de métal (zinc, nickel, sélénium, plomb, cadmium, composés d'antimoine et dioxyde de titane).
- réduire les poussières et fines particules de caoutchouc produites par le surfaçage au moyen d'un cyclone primaire et d'un filtre à sacs secondaire ou d'un dépoussiéreur électrique à deux étages.

Il peut se produire des émissions de COV et de polluants atmosphériques dangereux. Des solvants sont utilisés aux différents stades de la fabrication de produits en caoutchouc. Les mesures de prévention et de maîtrise des émissions de COV recommandées consistent, notamment, à :

- manipuler prudemment les solvants pour éviter les déversements et les émissions fugitives. Des recommandations sur l'entreposage et la manipulation des solvants et autres matières dangereuses sont présentées dans les **Directives EHS générales** ;
- au lieu de solvants, utiliser si possible des démolants à base d'eau, de silicium et autres produits.

Il peut être nécessaire de mettre en place des équipements de réduction des émissions en cas d'émissions importantes de COV. Si le caoutchouc doit être vulcanisé pour obtenir les caractéristiques recherchées, la vulcanisation peut produire des

² Bien que les CFC soient encore couramment utilisés dans ces procédés, ils sont aujourd'hui déconseillés dans les règles de bonne pratique de production industrielle car ils contribuent à l'effet de serre et à l'appauvrissement de la couche d'ozone.

³ Imidazolidine-2-thione, diéthanolamine, hydroquinone, phénols, alpha naphthylamine, p-phénylènediamine, peroxyde de dibenzoyl, phtalate de dibutyl, phtalate de dioctyle et bis(2-éthylhexyle) adipate.

émissions contenant du dioxyde de soufre (SO₂). Celles-ci peuvent être réduites au moyen d'un épurateur.

Eaux usées

Les effluents peuvent contenir des solvants, des huiles, des composés organiques solubles dans l'eau ou insolubles, libérés dans l'eau de traitement, de contact et de nettoyage, ainsi que des particules solides allant de moins d'un micron à plusieurs millimètres de diamètre.

Plastiques

Les eaux de traitement utilisées pour le moulage et le formage des plastiques peuvent être classées en trois grandes catégories : 1) eau de refroidissement (ou de chauffage) utilisée dans la fabrication des plastiques ; 2) eau de décapage et de lavage des produits fabriqués et du matériel ; et 3) eau de finissage utilisée pour éliminer les déchets de plastique ou lubrifier le produit.

Les rejets d'eau de refroidissement (ou de chauffage) peuvent être une source de pollution thermique. Les polluants toxiques détectables dans les eaux de traitement rejetées lors du refroidissement ou du chauffage sont les phtalates tels que le phtalate de 2-éthylhexyle.

L'eau de nettoyage peut se caractériser par une DBO (demande biochimique en oxygène), une DCO (demande chimique en oxygène) et un TSS (total des solides en suspension) non négligeables. Elle contient également des huiles et des graisses, des phénols et du zinc. L'eau de finissage peut contenir des niveaux élevés de TSS et d'additifs hydrosolubles (phtalates).

Les mesures de lutte contre la pollution liée aux eaux de contact, de nettoyage et de finissage recommandées consistent, notamment, à :

- adopter de bonnes méthodes d'entretien ;
- pour l'eau de contact et de finissage, installer un dispositif de traitement au charbon activé permettant d'éliminer les composés organiques solubles, notamment les phtalates (particulièrement important dans la fabrication des produits en PVC plastifié) ;
- utiliser dans la mesure du possible des plastifiants biodégradables ;
- recycler l'eau de nettoyage et de finissage dans des cuves de sédimentation / décantation et éliminer les solides, huiles et graisses en suspension.

Le refroidissement à l'eau peut entraîner une forte consommation d'eau, à quoi s'ajoutent des rejets d'eau chaude ainsi que des résidus de biocides et d'autres agents antialgues utilisés dans le procédé de refroidissement. Les stratégies recommandées pour la gestion de l'eau de refroidissement sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

Caoutchoucs

Les opérations de refroidissement, de chauffage, de vulcanisation et de nettoyage peuvent produire des effluents liquides. Les solides en suspension, les huiles et les graisses sont des contaminants potentiels, de même que les métaux-traces comme le zinc. Les eaux usées proviennent des divers procédés de fabrication (nettoyage des bassins de réception du latex frais et des centrifugeuses, entre autres). Les effluents de trempage des produits en latex peuvent contenir des additifs qui sont utilisés pour traiter le caoutchouc. Les eaux usées non suffisamment traitées peuvent dégager des odeurs déplaisantes.

Les traitements recommandés sont la sédimentation des solides, l'ajustement du pH et l'élimination des huiles et des graisses. Les eaux usées doivent être piégées dans un purgeur

qui laisse le caoutchouc remonter à la surface de façon à le recycler ou le réutiliser. Ces eaux sont ensuite envoyées vers l'unité d'épuration. Il est également conseillé d'installer des dispositifs de refroidissement ou de chauffage en circuit fermé.

Déchets solides

La fabrication de produits en plastique et en caoutchouc ne produit généralement pas beaucoup de déchets solides car les rebuts de façonnage et de finissage peuvent être recyclés. Une source importante de déchets solides est le caoutchouc vulcanisé issu des opérations de mélangeage, de calandrage et d'extrusion, en plus des déchets de caoutchouc produits durant le moulage, des particules provenant des filtres à sacs dans les aires de mélangeage, des mélangeurs Banbury et des meules.

Outre les principes directeurs concernant la gestion et l'évacuation des déchets industriels, qui figurent dans les **Directives EHS générales**, différentes mesures de gestion sont recommandées, elles consistent notamment à :

- séparer les flux d'effluents par des moyens appropriés (caoutchouc non vulcanisé, caoutchouc vulcanisé et produits non conformes) ;
- recycler le caoutchouc non vulcanisé et les rebuts de caoutchouc faiblement vulcanisé dans un mélangeur Banbury ;
- recycler sur place ou déchiqueter les rebuts de caoutchouc vulcanisé et produits non conformes pour fabriquer d'autres produits ;
- rebroyer les rebuts de polymères thermoplastiques et les mélanger avec des matériaux de première transformation ;
- si la réutilisation ou le recyclage ne sont pas possibles, évacuer les rebuts de caoutchouc (y compris les polymères surchauffés) conformément aux recommandations concernant la gestion des déchets industriels formulées dans les **Directives EHS générales**.

1.2 Hygiène et sécurité au travail

Les effets sur l'hygiène et la sécurité au travail liés aux opérations des installations de fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc sont les mêmes que pour la plupart des installations industrielles. La prévention et l'atténuation de ces effets sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

1.2.1 Métaux

Les principaux problèmes d'hygiène et de sécurité au travail associés à la fabrication de pièces métalliques touchent aux aspects suivants :

- Risques chimiques
- Risques physiques
- Bruit
- Rayonnement

Risques chimiques

Les substances chimiques utilisées pour la fabrication de pièces métalliques, notamment durant le frittage, la préparation de surface et le finissage, posent des risques d'inhalation et de contact avec la peau. Les risques d'inhalation concernent les émanations contenant des métaux, des oxydes métalliques, des composés organiques et inorganiques, des particules, des poussières et des COV. Les risques de contact avec la peau concernent les éléments allergènes (chrome, nickel, plomb et béryllium). Les risques chimiques doivent être gérés sur base des résultats d'une analyse de la sécurité du travail à accomplir et d'une enquête sur l'hygiène industrielle, et conformément aux directives en matière d'hygiène et de sécurité au travail figurant dans les **Directives EHS générales**. Les mesures de protection comprennent la formation du personnel, l'octroi d'un permis de travail et l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI). Les mesures particulières de prévention et de contrôle de

l'exposition professionnelle aux émissions atmosphériques lors de la fabrication de pièces métalliques consistent à :

- utiliser un outillage automatisé. Si un opérateur doit être présent, prévoir une cabine fermée munie d'un système de ventilation ;
- exiger le port d'un casque et d'un masque par les employés exposés à des émissions potentiellement nocives (pendant les activités de soudage, par exemple) ;
- utiliser des dispositifs de ventilation par aspiration et recyclage de l'air (pour la trempe et le finissage superficiel, par exemple).

Risques corporels

Les risques corporels tiennent aux contacts avec les outils et machines de découpage et de façonnage des métaux, qui peuvent facilement trancher une main, et à l'exposition aux projections de particules métalliques (copeaux de métal projetés durant l'usinage, par exemple), qui peuvent blesser les yeux. La chaleur, le froid et le stress ergonomique peuvent également causer des dommages corporels. Les pièces lourdes ou leurs conteneurs sont souvent déplacés au moyen d'une grue ou d'un chariot à fourche. Les directives concernant la gestion des risques corporels figurent dans les **Directives EHS générales**.

Bruit

La fabrication de pièces métalliques est par nature bruyante car elle fait appel à une multitude d'équipements et activités mécaniques. On trouvera les directives concernant la gestion du bruit dans les **Directives EHS générales**.

Rayonnement

Les opérateurs peuvent être exposés à des rayonnements pendant le soudage. Certaines techniques de soudage (soudage à l'arc, au plasma, au laser et par faisceau d'électrons) utilisent beaucoup d'énergie et émettent des rayonnements dangereux. Il est recommandé d'utiliser si

possible du matériel automatisé ou des équipements de protection individuelle contre les rayonnements. Les appareils à rayon X utilisés pour le contrôle continu de la qualité des produits sont une autre source de rayonnement. Les mesures recommandées pour gérer les risques liés au rayonnement ionisant sont décrites dans les **Directives EHS générales**.

1.2.2 Plastiques et caoutchoucs

La fabrication de pièces en plastique et en caoutchouc pose deux types de risques sur le plan de la santé et de la sécurité au travail :

- Risques corporels
- Risques chimiques

Risques corporels

La plupart des risques corporels liés au traitement des plastiques et du caoutchouc sont les mêmes que pour la fabrication de pièces métalliques. Ils doivent être gérés conformément aux méthodes décrites dans les **Directives EHS générales**.

Il existe cependant des risques corporels propres à cette branche d'activité qui doivent être gérés comme suit :

- utiliser des interrupteurs électriques et des freins mécaniques pour interrompre la rotation des éléments tournants/lames lorsque des employés se trouvent à proximité ;
- installer des interrupteurs d'urgence à proximité des postes de commande ;
- poster des gardes pour empêcher l'accès aux orifices d'alimentation et aux points de déversement près des rotors, tranchets, lames rotatives et hélices/pistons. Pour faciliter l'entretien, il est possible d'utiliser des dispositifs de verrouillage temporisé pour empêcher l'accès aux broyeurs, agglomérateurs et extrudeurs ;

- utiliser des écrans ou des volets de protection contre les projections par les orifices d'alimentation des machines ;
- appliquer des procédures de verrouillage, en plus des autres mesures de prévention et de contrôle des risques corporels examinées dans les **Directives EHS générales**.

Risques chimiques

Incendies et explosions

Les incendies qui surviennent dans les installations de fabrication de matières plastiques peuvent produire une fumée âcre et des gaz toxiques, notamment du monoxyde de carbone. Ces incendies peuvent se propager rapidement et être difficiles à éteindre. Les sources d'inflammation doivent être contrôlées en interdisant de fumer et d'effectuer un travail à chaud aux endroits à haut risque. Les **Directives EHS générales** donnent des renseignements complémentaires sur la planification des mesures d'urgence et les plans d'évacuation en cas d'incendie.

Poussières de polymères : Les broyeurs produisent une poussière fine qui est souvent combustible. Il peut se produire une explosion s'il y a une forte concentration de particules fines en suspension dans l'air, comme dans le cas des poussières de polymères formées près du broyeur lorsque des plastiques alvéolaires rigides sont traités et chaque fois que des granules, grosses ou fines, sont séparées mécaniquement par tamisage. Une poudre fine peut s'accumuler sur les murs et sur les surfaces horizontales difficiles à atteindre lors de l'entretien courant. Bien que la présence de poussières de polymères soit inévitable, cela ne présente un danger qu'en cas de matériau rigide (par exemple, si la température de transition vitreuse est supérieure à la température ambiante). Le risque est plus grave dans le cas des mousses en raison de leur faible résistance à la fragmentation.

Les mesures de prévention et de réduction de ce risque recommandées consistent, notamment, à :

- concevoir les installations de manière à éviter dans la mesure du possible la création de surfaces sur lesquelles des poussières de polymères peuvent se déposer ou coller (par effet électrostatique) ;
- atténuer la formation de poussières grâce à l'entretien régulier des couteaux en tête et des dispositifs de réglage ;
- éliminer les sources d'inflammation. Les pièces métalliques doivent être mises à la terre pour réduire la formation d'étincelles d'électricité statique. Il convient également d'interdire de fumer et d'utiliser une flamme nue. Installer un séparateur magnétique pour éviter que des pièces métalliques pénètrent dans le broyeur.

Pentane : Les billes préexpansées de polystyrène expansible (PSE) contiennent du pentane, un gaz facilement inflammable qui peut être libéré durant l'entreposage et le transport du PSE, et par le produit fini pendant une courte durée après sa fabrication. Les mesures recommandées pour prévenir et atténuer ce risque consistent, notamment, à :

- mettre en place un système de permis de travail pour les aires d'entreposage de PSE ;
- interdire de fumer dans tous les endroits où le PSE est fabriqué, utilisé ou entreposé ;
- étant donné que, durant la pré-expansion, les vapeurs de pentane sont mélangées avec de la vapeur d'eau, ce qui les rend moins inflammables, assurer une bonne ventilation pour disperser les vapeurs de pentane ;
- mettre à la masse les transporteurs pneumatiques et transporter lentement les produits pour réduire l'électricité statique ;
- entreposer les billes expansibles et les pièces préformées dans des aires bien ventilées. Dans les silos de maturation, des mélanges explosifs peuvent se former dans la chambre de pression. Les silos doivent être mis à la masse et ventilés pour maintenir la teneur en pentane en dessous

de la limite d'explosion. Les produits finis doivent également être entreposés après le moulage dans un endroit bien ventilé et ignifugé ;

- utiliser des interrupteurs, éclairages, moteurs, ventilateurs et appareils électriques portables pouvant fonctionner en présence de vapeurs inflammables ;
- le découpage au fil chaud pouvant provoquer des incendies, munir le système de transport par blocs d'un dispositif de verrouillage qui coupe l'alimentation électrique si le transporteur s'arrête ;
- utiliser un détecteur de gaz pour localiser les risques d'émanations de pentane et surveiller les concentrations ;
- munir les aires de manipulation de PSE d'un système d'extinction conçu sur la base des résultats d'une analyse des risques.

Qualité de l'air et exposition dermique

Des poussières peuvent se former durant l'usinage et le finissage des pièces polymérisées. Le compoundage à température ambiante pour les procédés non réactifs peut produire des poussières très fines qui risquent d'être inhalées. La présence de monomères qui n'ont pas réagi peut être un problème, notamment dans le cas des résines styréniques.

Les principales sources d'émissions de COV sont les ingrédients à faible température d'ébullition (solvants, monomères piégés, etc.) et la décomposition thermique des substances les plus labiles. Les émissions de COV augmentent avec la température.

Les polymères thermoplastiques ne sont généralement pas dangereux pour la santé du personnel. Les résines qui entrent dans la composition des plastiques therm durcis contiennent cependant des matières potentiellement dangereuses. Les résines époxydes et les durcisseurs ont une faible pression de vapeur et ne présentent normalement pas de risques

d'émissions atmosphériques, sauf dans un mélange vaporisé ou durci à haute température. Le risque d'exposition thermique est en revanche très élevé, notamment dans le cas des amines aromatiques, qui pénètrent à l'intérieur de la plupart des gants de protection ordinaires.

Les isocyanates présents dans les polyuréthanes peuvent poser un risque grave d'inhalation ou de contact avec la peau. Pour les résines phénoliques et aminiques, le phénol et le formaldéhyde posent un risque d'exposition. Les résines urée- et mélamine-formaldéhyde présentent des risques similaires. Une attention particulière doit être accordée aux procédés entraînant la décomposition des produits en polyuréthane en présence de chaleur, tels que le soudage, l'élimination à chaud des vernis d'isolation électrique et le découpage des mousses au fil chaud.

Différents solvants peuvent être présents dans le traitement réactif des matières therm durcissables. Ils peuvent être utilisés sur le lieu de travail comme composant de résines ou de durcissants, dans le procédé de fabrication ou durant le nettoyage.

Les mesures de prévention des risques d'exposition professionnelle recommandées consistent, notamment, à :

- retenir, comme principaux systèmes de contrôle technique pour les procédés de fabrication de pièces en plastiques et en caoutchouc, l'isolation (aires d'entreposage isolées, aires de traitement séparées, enceintes, systèmes clos) et la ventilation de tirage. Les dispositifs de contrôle doivent être mis en place dans les aires de mélangeage et de compoundage, les aires de traitement à chaud (notamment les autoclaves) et les aires de finissage et de réparation. Il faut contrôler les dégagements gazeux des réactions exothermiques ;

- installer des dispositifs appropriés de contrôle de la ventilation et d'extraction des échappements (adsorbours au charbon activé) pour protéger les employés contre l'exposition aux substances toxiques, poussières et fibres. Prévoir une ventilation adéquate, avec au moins six renouvellements d'air à l'heure ;
- utiliser une ventilation adéquate dans les aires de travail pour maintenir le taux de concentration des isocyanates à moins de 25 % du niveau potentiellement nocif ;
- fixer le temps de séjour et la température de traitement des polymères utilisés dans le fût de façon à minimiser la surchauffe des plastiques et à éviter la formation de fumées ;
- procéder par extraction dans des unités de pyrolyse ou par d'autres moyens de protection contre les fumées au « brûlage » des gicleurs, des filières à bloc répartiteur, des injecteurs, des robinets d'écoulement des matériaux et des plaques de filtre, ainsi que des matières solidifiées ;
- prévoir des procédures d'urgence claires (y compris l'évacuation de la zone potentiellement affectée) à tous les endroits où des substances thermosensibles sont traitées. La dégradation rapide du polymère dans le fût peut produire des émanations de formaldéhyde ou de chlorure d'hydrogène (HCl) ;
- surveiller les températures dans toutes les sections de la chaîne de production. Installer des thermocouples adéquats et fiables pour mesurer la température de traitement. Il est recommandé d'utiliser un régulateur proportionnel-différentiel-intégral ou un système de chauffage contrôlé par ordinateur individuel pour atténuer les fluctuations thermiques qui entraînent une production instable et des dégagements de fumées.
- promouvoir le port de gants, de vêtements de protection et d'autres équipements de protection individuelle appropriés, notamment pour la manipulation de résines, durcisseurs et solvants ;
- choisir, utiliser, entretenir et nettoyer soigneusement les équipements de protection individuelle. Il est particulièrement important de fournir des gants adéquats en raison des propriétés de pénétration des produits chimiques industriels ;
- utiliser des appareils respiratoires dans les cas suivants : risque de forte concentration de solvants et de poussières en suspension dans l'air (durant le mélangeage des résines et les activités de finissage/réparation) ; grande surfaces de traitement et nombreuses manipulations ; dégagements de chaleur ; et production ou manipulation de polyuréthanes à des températures risquant d'entraîner la dégradation du polymère;
- distribuer aux opérateurs la fiche signalétique du fournisseur/ distributeur pour la formulation utilisée.

1.3 Santé et sécurité de la population

Les effets sur la santé et la sécurité de la populations durant la construction, l'exploitation et le démantèlement des installations de fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc sont les mêmes que pour la plupart des installations industrielles. Ces effets sont examinés dans les **Directives EHS générales**.

2.0 Indicateurs de performance et suivi des résultats

2.1 Environnement

Directives pour les émissions et les effluents

Les tableaux 5 et 6 indiquent les valeurs de référence applicables aux émissions et aux effluents associés à la fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc. Les valeurs indiquées pour les émissions et les effluents industriels dans cette branche d'activité correspondent aux bonnes pratiques internationales en ce domaine, telles qu'exprimées par les normes pertinentes des pays qui ont des cadres

réglementaires reconnus. Ces valeurs sont applicables dans des conditions d'exploitation normales et dans des installations conçues et utilisées de manière appropriée, conformément aux principes de prévention et de lutte antipollution décrits dans les précédentes sections de ce document. Elles doivent être relevées, pour des effluents non dilués, pendant au moins 95 % du temps d'exploitation de l'usine ou de l'unité considérée, calculé sur la base du nombre annuel d'heures d'exploitation. Tout écart par rapport à ces valeurs limites qui tiendrait à des conditions locales spécifiques au projet considéré doit être justifié dans l'évaluation environnementale.

Les valeurs de référence relatives aux effluents s'appliquent aux effluents traités directement rejetés dans les eaux de surface destinées à un usage général. Des niveaux de rejet propres à chaque site peuvent être définis en fonction des systèmes publics de collecte et de traitement des eaux d'égout et des conditions d'utilisation qui y sont liées, ou, dans le cas des effluents rejetés directement dans les eaux de surface, sur base de la classification des usages des ressources en eau décrites dans les **Directives EHS générales**.

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

émissions atmosphériques pour la fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc		
Polluant	Unité	Valeur de référence
COV – nettoyage de surface	mg/Nm ³	20-75 ⁽¹⁾
COV – revêtement métallique et plastique	mg/Nm ³	100 (consommation de solvants inférieure ou égale à 15 tonnes/an) 75 (consommation de solvants supérieure à 15 tonnes/an) 50 (séchage)
COV – conversion du caoutchouc	mg/Nm ³	20 ⁽²⁾
COV – vulcanisation du caoutchouc	mg/Nm ³	80
Hydrocarbures halogénés volatils – traitement des surfaces métalliques	mg/Nm ³	20
Particules – traitement des surfaces métalliques	mg/Nm ³	5
Particules – traitement des plastiques	mg/Nm ³	3
Chlorure d'hydrogène	mg/Nm ³	10
Oxydes d'azote ⁽³⁾	mg/Nm ³	350
Ammoniac	mg/Nm ³	50
NOTES:		
1. 30 minutes en moyenne pour les sources confinées. 20 mg/Nm ³ pour les gaz perdus dans le nettoyage de surface avec des COV classés comme agents cancérigènes, mutagènes ou dangereux pour la procréation (locutions de risque R45, R46, R49, R60, R61) à un débit massique égal ou supérieur à 10 g/heure; et / ou des COV halogénés classés R40 et ayant un débit massique égal ou supérieur à 100 g/heure) ; 75 mg/Nm ³ pour les gaz perdus dans les autres méthodes de nettoyage de surface		
2. Installations consommant plus de 15 tonnes de solvants par an		
3. Air sec contenant 11 % d'O ₂		

Tableau 5 : Valeurs de référence applicables aux

Tableau 6 : Concentrations d'effluents pour la fabrication de pièces en métal, plastique et caoutchouc

Polluant	Unité	Valeur indicative
pH	S.U.	6 – 9
DCO	mg/L	250
TSS	mg/L	50 25 (galvanoplastie)
Huiles et graisses	mg/L	10
Aluminium	mg/L	3
Arsenic	mg/L	0,1
Cadmium	mg/L	0,1
Chrome (total)	mg/L	0,5
Chrome (hexavalent)	mg/L	0,1
Cuivre	mg/L	0,5
Fer	mg/L	3
Plomb	mg/L	0,2
Mercure	mg/L	0,01
Nickel	mg/L	0,5
Argent	mg/L	0,2
Étain	mg/L	2
Zinc	mg/L	2
Cyanures (totaux)	mg/L	1
Cyanures (libres)	mg/L	0,2
Ammoniac	mg/L	10 20 (galvanoplastie)
Fluorures	mg/L	20
Phénols	mg/L	0,5
Azote total	mg/L	15
Phosphore total	mg/L	5
Soufre	mg/L	1
Composés organohalogénés volatils (VOX)	mg/L	0,1
Toxicité	À déterminer au cas par cas	
Accroissement de température	°C	<3 ^a

^a À la limite d'une zone de mélange définie scientifiquement et en tenant compte de la qualité de l'eau ambiante, de l'utilisation des eaux réceptrices, des récepteurs potentiels et de la capacité d'assimilation de l'environnement.

Tableau 7 – Consommation de ressources et d'énergie

Apports par unité de produit	Unité de charge	Référence industrielle
Énergie (métal fabriqué)		
Métallurgie des poudres	GJ/t pièce finie	28-30
Extrusion à froid / à chaud	GJ/t pièce finie	40-42
Forgeage à chaud	GJ/t pièce finie	50
Usinage	GJ/t pièce finie	80
Consommation spécifique de chaleur – Pièces forgées en acier	MJ/tonne/K	7
Consommation d'électricité – traitement thermique des métaux	Kg/kWh	2,7 – 3,5
Soudage (fusion de tôles d'acier de 4mm)	KJ/m	500 – 2 500
Énergie		
Consommation spécifique d'énergie (Plastiques)	kWh/kg	2,8 – 3,0
Compoundage	kWh/kg	0,6-1,0
Extrusion-soufflage de films	kWh/kg	1,0
Moulage par injection-soufflage	kWh/kg	3,0
Formage sous vide	kWh/kg	6,0 – 6,5
Extrusion de mousses	kWh/kg	0,3
Caoutchouc		
Consommation spécifique d'énergie		
Électricité	kWh/tonne	750
Chaleur (combustible)	Mcal/tonne	1,25
Eau		
Consommation d'eau (moyenne par installation)	ML/jour	2 - 3
Sources : US DoE. 2003; The Rubber Association of Canada. 1997; US EPA. 2005; EIPPCB. 2006		

Utilisation de ressources

On trouvera au tableau 7 des exemples d'indicateurs de consommation de ressources en eau et en énergie dans ce secteur. Les valeurs de référence sont fournies uniquement à titre de comparaison et chaque projet doit tendre à améliorer régulièrement les résultats dans ces domaines.

Suivi des impacts environnementaux

Des programmes de suivi des impacts environnementaux dans cette branche d'activité doivent être mis en place de manière à couvrir toutes les activités qui peuvent avoir des impacts environnementaux importants dans des conditions normales ou anormales d'exploitation. Les activités de suivi des impacts

environnementaux doivent être basées sur des indicateurs directs ou indirects d'émissions, d'effluents et d'utilisation des ressources, applicables au projet considéré.

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

2.2 Hygiène et sécurité au travail

Directives sur l'hygiène et la sécurité au travail

Les résultats obtenus dans le domaine de l'hygiène et de la sécurité au travail doivent être évalués par rapport aux valeurs limites d'exposition professionnelle publiées à l'échelle internationale, comme les directives sur les valeurs limites d'exposition (TLV®) et les indices d'exposition à des agents biologiques (BEIs®) publiés par American Conference of Governmental Industrial Hygienists⁴, Pocket Guide to Chemical Hazards publié par United States National Institute for Occupational Health and Safety⁵, les valeurs plafonds autorisées (PEL) publiées par Occupational Safety and Health Administration of the United States⁶ les valeurs limites d'exposition professionnelle de caractère indicatif publiées par

les États membres de l'Union européenne⁷, ou d'autres sources similaires.

Fréquence des accidents mortels et non mortels

Il faut s'efforcer de ramener à zéro le nombre d'accidents du travail dont peuvent être victimes les travailleurs (employés et sous-traitants) dans le cadre d'un projet, en particulier les accidents qui peuvent entraîner des jours de travail perdus, des lésions d'une gravité plus ou moins grande, ou qui peuvent être mortels. Les chiffres enregistrés pour le projet concerné peuvent être comparés à ceux des installations de pays développés opérant dans la même branche d'activité, présentés dans des publications statistiques (par exemple US Bureau of Labor Statistics et UK Health and Safety Executive)⁸.

Suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail

Il est nécessaire d'assurer le suivi des risques professionnels liés aux conditions de travail spécifiques au projet considéré. Ces activités doivent être conçues et poursuivies par des experts agréés⁹ dans le contexte d'un programme de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies, des événements dangereux et autres incidents. Les installations doivent par ailleurs tenir un registre des accidents du travail, des maladies, des événements dangereux et autres incidents. De plus amples informations sur les programmes de suivi de l'hygiène et de la sécurité au travail sont données dans les **Directives EHS générales**.

⁴ Disponible à l'adresse suivante : <http://www.acgih.org/TLV/> et <http://www.acgih.org/store/>

⁵ Consulter : <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

⁶ Disponible à l'adresse suivante : http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDAR DS&p_id=9992

⁷ Consulter : http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

⁸ Consulter : <http://www.bls.gov/iif/> et <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

⁹ Les professionnels agréés peuvent être des hygiénistes industriels diplômés, des hygiénistes du travail diplômés, des professionnels de la sécurité brevetés ou tout titulaire de qualifications équivalentes.

3.0 Bibliographie et sources d'informations supplémentaires

Commission européenne. 1999. European Union Council Directive 1999/13/EC of 11 March 1999 on the Limitation of Emissions of Volatile Organic Compounds due to the Use of Organic Solvents in Certain Activities and Installations. Bruxelles : Commission européenne. Disponible à <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l28029b.htm>

Environment Australia. 1999. National Pollution Inventory. Emission Estimation Technique Manual for Galvanizing, Version 1.1, 8 February 2001. Canberra: Commonwealth of Australia. Disponible à http://www.npi.gov.au/handbooks/approved_handbooks/pubs/galvanising.pdf

Environment Australia. 1999. National Pollution Inventory. Emission Estimation Technique Manual for Electroplating and Anodising. Canberra: Commonwealth of Australia. Disponible à http://www.npi.gov.au/handbooks/approved_handbooks/pubs/felectro.pdf

Environment Australia. 1999. National Pollution Inventory. Emission Estimation Technique Manual for Surface Coating. Canberra: Commonwealth of Australia. Disponible à http://www.npi.gov.au/handbooks/approved_handbooks/pubs/fsurf.pdf

European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). 2001. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metal Processing Industry. Seville: EIPPCB. Disponible à <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). 2001. IPPC Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Processes. Seville: EIPPCB. Disponible à <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). 2006. IPPC Reference Document on Best Available Techniques (BAT) in the Surface Treatment of Metals and Plastics. Seville: EIPPCB. Disponible à <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). 2007. IPPC Reference Document on Best Available Techniques (BAT) on Surface Treatment using Organic Solvents. Seville: EIPPCB. Disponible à <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

Helsinki Commission (HELCOM). 2002. Reduction of Discharges and Emissions from Metal Surface Treatment. Recommendation 23/7. Helsinki: HELCOM. Disponible à http://www.helcom.fi/Recommendations/en_GB/rec23_7/

Industrial Accident Prevention Association (IAPA). An Industry Analysis by Firm Size (2002 versus 2001), EIW Snapshot Data as of 12/2002 and 12/2001. Mississauga, ON: IAPA. Disponible à http://www.iapa.ca/business/sb_industry_stats.asp#industry

NorthEast Waste Management Officials Association (NEWMOA). 1998. Pollution Prevention in Metal Painting and Coating Operations. Boston, MA: NEWMOA. Disponible à <http://www.newmoa.org/publications/#hw>

NorthEast Waste Management Officials Association (NEWMOA). 1998. Pollution Prevention in Metal Finishing. Boston, MA: NEWMOA. Disponible à <http://www.newmoa.org/publications/#hw>

NorthEast Waste Management Officials Association (NEWMOA). 1998. Pollution Prevention in the Primary Metals Industry. Boston, MA: NEWMOA. Disponible à <http://www.newmoa.org/publications/#hw>

The Rubber Association of Canada. 1997. Energy Efficiency Opportunities in the Canadian Rubber Industry. In collaboration with Natural Resources Canada. Mississauga, Canada. Disponible à <http://oe.nrcan.gc.ca/infosource/pdfs/M92-137-1997E.pdf> United Kingdom Health and Safety Executive (HSE). 2005. Table 1: List of approved workplace exposure limits. EH40/2005 Workplace exposure limits. London: HSE. Disponible à <http://www.hse.gov.uk/coshh/>

United States (US) Department of Energy. 2003. Supporting Industries Energy and Environmental Profile. Prepared for Oak Ridge National Laboratory and US Department of Energy, Industrial Technologies Program. Disponible à http://www.eere.energy.gov/industry/energy_systems/pdfs/si_profile.pdf

United States (US) Environmental Protection Agency (EPA). 2005. Profile of the Rubber and Plastics Industry. 2nd Edition. EPA Office of Compliance Sector Notebook Project. Profile EPA/310-R-05-003. Washington, DC: US EPA. Disponible à <http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/assistance/sectors/notebooks/rubplasn.pdf>

US EPA. 1974. Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of Environment. Part 428 – Rubber Manufacturing Point Source Category. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1981. Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of Environment. Part 413 – Electroplating Point Source Category. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1983. Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of Environment. Part 433 – Metal Finishing Point Source Category. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1984. Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of Environment. Part 463 – Plastics Molding and Forming Point Source Category. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1993. Code of Federal Regulations. Title 40: Protection of Environment. Part 60 - Standards of Performance for New Stationary Sources. July 1, 1993. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1994. Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of Environment. Part 63 – National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories. Washington, DC. Office of the Federal Register. Disponible à <http://www.epa.gov/epacfr40/chapt-1.info/>

US EPA. 1995. Profile of the Fabricated Metal Products Industry. EPA Office of Compliance Sector Notebook Project. EPA/310-R-95-007. Washington, DC: US EPA. Disponible à <http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/assistance/sectors/notebooks/fabmetnsnpt1.pdf>

Annexe A : Description générale de la branche d'activité

Fabrication de pièces métalliques

Les activités de fabrication de pièces métalliques examinées ici peuvent être groupées en deux grandes phases : le façonnage (y compris les traitements thermiques) et le finissage (traitements de surface, nettoyage et revêtement). Les activités de fonderie des métaux sont examinées dans les **Directives EHS générales**.

Traitements thermiques et formage

Les traitements thermiques visent à modifier les propriétés physiques des pièces métalliques par l'application de cycles de chauffage et de refroidissement contrôlés (trempe, revenu et recuit). Le métal peut être travaillé à chaud, à froid ou les deux pour obtenir la forme désirée. Durant la déformation à froid, un traitement thermique intermédiaire (recuit) peut être appliqué pour éliminer le durcissement et maintenir la malléabilité du métal, en répétant au besoin cette étape plusieurs fois selon les caractéristiques particulières de l'alliage. Après le traitement thermique, la surface est nettoyée pour éliminer la rouille, la calamine et les rebuts. Les procédés de fabrication de pièces métalliques utilisent généralement des liquides de coupe (éthylène glycol, par ex.), des solvants détachants et dégraissants, des acides, des alcalis et des métaux lourds. On utilise généralement des huiles pour le formage et le découpage du métal.

Soudage

Le soudage est le principal procédé d'assemblage de pièces métalliques. Il existe plus d'une vingtaine de procédés de soudage mais les deux les plus courants, qui représentent près de 70 % des activités de soudage, sont le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée et le soudage à l'arc sous gaz avec fil plein (TIG ou MIG / MAG) où le fil-électrode est protégé de l'atmosphère extérieur par un gaz. Les autres procédés sont le

soudage au four et au chalumeau oxyacétylénique, le soudage au plasma, le soudage au laser et le soudage par faisceau d'électrons.

Préparation de surface

Avant les traitements de finition (revêtement, peinture et déposition chimique), les surfaces métalliques sont nettoyées et apprêtées par d'autres procédés pour créer les conditions chimiques nécessaires au traitement de finition. La préparation de surface peut consister en un simple décapage par projection d'abrasif qui utilise un jet d'eau sous forte pression (avec des poudres abrasives telles que l'alumine ou la silice), un jet d'air ou du papier de verre (avec ou sans eau comme lubrifiant et refroidisseur).

Les solutions de nettoyage alcalin contiennent trois principaux éléments : 1) des adjuvants pour détergents (hydroxydes et carbonates alcalins), qui sont le principal ingrédient ; 2) des adjuvants organiques ou inorganiques, qui facilitent le nettoyage ou modifient la surface métallique ; et 3) des surfactants. Le nettoyage alcalin est souvent complété par une action mécanique, un bain à ultrasons ou un dégraissage électrolytique. Le procédé de nettoyage alcalin peut également servir à éliminer les sols organiques.

Le nettoyage acide ou le décapage peuvent être utilisés pour préparer les surfaces métalliques en éliminant les oxydes et la calamine par réaction chimique avec un acide tel que l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide fluorhydrique et l'acide nitrique. Par exemple, la plupart des aciers ordinaires sont décapés à l'acide sulfurique ou chlorhydrique, tandis que les aciers inoxydables sont décapés à l'acide chlorhydrique ou fluorhydrique. Bien que les deux procédés soient similaires, le décapage aux acides est généralement employé pour éliminer la calamine à la surface des produits d'atelier semi-finis, alors

que le nettoyage acide sert à préparer les surfaces métalliques juste avant la galvanoplastie, le peinturage et les autres finitions.

Enfin, on utilise des procédés de nettoyage chimique complexes qui consistent à appliquer des solvants organiques en plusieurs phases pour dégraisser la surface du métal. Le dégraissage par émulsion, par exemple, utilise des solvants organiques (kérosène, huiles minérales et glycols) dispersés en milieu aqueux.

Finissage

Anodisation

L'anodisation est un traitement électrolytique qui revêt la surface du métal d'une pellicule d'oxydes insolubles. Ce procédé est surtout utilisé pour l'aluminium. Les procédés usuels d'anodisation de l'aluminium sont l'anodisation à l'acide chromique, à l'acide sulfurique et à l'acide borique-sulfurique. Le procédé à l'acide sulfurique est le plus courant. Après l'anodisation, les pièces métalliques sont généralement rincées et scellées à l'acide chromique, à l'acétate de nickel, à l'acétate de nickel-cobalt ou à l'eau chaude.

Revêtement avec conversion chimique

Les procédés de revêtement avec conversion chimique sont la chromatisation, la phosphatation, l'application d'un colorant et la passivation. La chromatisation consiste à former une couche de conversion au chromate sur différents métaux par un traitement chimique ou électrochimique. Les solutions, qui contiennent du chrome hexavalent et d'autres substances souvent dangereuses, réagissent avec la surface du métal pour former une couche constituée d'un mélange complexe de chrome, métaux de base et autres composants. Dans la phosphatation, la couche de phosphate est formée par immersion d'acier, de fer ou d'acier zingué dans une solution diluée de sels de

phosphate, d'acide phosphorique et autres réactifs pour préparer la surface en vue de traitements complémentaires.

Galvanoplastie

La galvanoplastie consiste à déposer une couche de métal sur une autre par électrodéposition. Dans la plupart des cas, des substances inorganiques sont appliquées à la surface du métal. Les métaux et alliages les plus souvent protégés par une électrodéposition sont le laiton (cuivre-zinc), le cadmium, le chrome, le cuivre, l'or, le nickel, l'argent, l'étain et le zinc. Durant l'électrodéposition, les ions métalliques en solution aqueuse sont réduits sur les pièces à traiter. La solution est généralement réapprovisionnée en ions métalliques par dissolution du métal solide des anodes, ou par reconstitution directe de la solution avec des sels ou des oxydes métalliques. On utilise souvent le cyanure, généralement sous forme de cyanure de sodium ou de potassium, comme agent complexant pour la galvanoplastie du cadmium et des métaux précieux, et dans une moindre mesure, pour d'autres solutions telles que les bains de cuivre et de zinc.

Peinturage

Le peinturage consiste à appliquer des revêtements essentiellement organiques sur une pièce dans un but de protection et/ou de décoration. La peinture est appliquée sous différentes formes telles que poudre sèche, peinture diluée au solvant et peinture diluée à l'eau. Différents procédés d'application sont employés (peinture au pistolet ou électrodéposition, par exemple).

Autres procédés de finissage des métaux

Le polissage est un procédé d'abrasion utilisé pour éliminer ou atténuer des défauts de surface qui altèrent l'apparence d'une pièce ou entravent son fonctionnement. Après le polissage, le nettoyage et le lavage de l'aire de travail peuvent produire des

effluents contenant des métaux. La métallisation au bain chaud est le revêtement d'une pièce métallique au moyen d'un autre métal pour créer une pellicule de protection par immersion dans un bain fondu. La galvanisation, qui consiste à plonger la pièce dans un bain de zinc fondu, est un procédé courant de revêtement par immersion à chaud. On utilise de l'eau pour rincer après le pré-lavage et pour laver après la pose du revêtement. Les effluents issus de ces activités contiennent souvent des métaux.

Fabrication de plastiques et caoutchoucs

Plastiques

La fabrication de pièces en plastique et en caoutchouc peut comporter ou non des réactions chimiques. Dans les *procédés non réactifs*, qui utilisent des polymères thermoplastiques, la pièce est fabriquée en plusieurs phases : chauffage de la matière première pour la faire fondre ; façonnage à travers une filière ou dans un moule ; et refroidissement à température ambiante pour obtenir un produit solide.

Les *procédés réactifs* utilisent des catalyseurs et additifs pour produire une réaction de polymérisation dans le moule entre des composés à faible poids moléculaire (monomères et prépolymères). Ce type de procédé est nécessaire pour la fabrication de pièces à base de polymères thermodurcissables. La fabrication de polyamides thermoplastiques par polymérisation anionique rapide de lactames (procédé de moulage par injection et réaction, ou RIM) fait également appel à des procédés réactifs.

Ces deux familles de polymères comprennent notamment les substances suivantes :

- Thermoplastiques : Polyoléfines : polyéthylènes (HDPE, LDPE, LLDPE), polypropylènes, styrènes (HIPS, ABS),

vinyles (PVC), acryliques (PMMA), cellulosiques, fluoroplastiques (Teflon, PVDF), polyesters (PET, PBT), polycarbonates, polyéthers, polyamides (Nylon 6, Nylon 6,6), polyacétals, caoutchoucs thermoplastiques (SBS, SIS) et polyimides;

- Thermodurcissables : Polyuréthanes, polyesters insaturés, époxydes, composés phénoliques.

Procédés de fabrication non réactifs

C'est le principal procédé de fabrication des polymères. Il recouvre tous les types de traitement « non réactif ». La matière première de base, le polymère, se présente sous la forme de granulés ou de poudres obtenues par polymérisation, une réaction qui nécessite un traitement chimique distinct généralement effectué dans de grandes unités de production. Si le polymère ne contient pas déjà les additifs voulus, le mélange est effectué avant le moulage, souvent dans une installation différente.

Les additifs sont mélangés avec les matières plastiques durant l'étape de compoundage/ mélangeage de la chaîne de production pour donner au produit final les caractéristiques désirées (certains de ces additifs peuvent aussi être appliqués sur la pièce profilée durant le finissage). Les additifs plastiques et leurs effets sur le produit final sont décrits ci-après :

- Les lubrifiants facilitent l'écoulement du plastique durant le moulage et l'extrusion ;
- Les antioxydants empêchent l'oxydation du plastique ;
- Les produits antistatiques confèrent un degré de conductivité électrique au plastique, ce qui évite l'accumulation de charges électrostatiques sur le produit fini ;
- Les gonflants donnent une structure alvéolaire au plastique ;
- Les colorants colorent la résine plastique ;

- Les agents nucléants et clarifiants accélèrent la solidification durant le refroidissement du polymère fondu et accroissent la transparence du produit final si le polymère est cristallisable ;
- Les ignifugeants réduisent le risque d'inflammation ;
- Les stabilisants thermiques aident à maintenir les propriétés chimiques et physiques du plastique en le protégeant contre les effets de la chaleur ;
- Les antichocs rendent le plastique moins fragile en améliorant sa résistance au craquelage ;
- Les peroxydes organiques déclenchent ou contrôlent la réaction de polymérisation des thermodurcissables et des thermoplastiques ;
- Les plastifiants accroissent la flexibilité des pièces en plastique et facilitent leur mise en œuvre ;
- Les agents anti-UV absorbent ou filtrent les rayons ultraviolets pour protéger le plastique contre leur action dégradante.

Les principaux procédés intervenant dans la fabrication de produits thermoplastiques sont les suivants : 1) mélange avec des additifs chimiques pour conférer les propriétés voulues aux résines plastiques ; 2) moulage pour transformer les plastiques sous forme de granulés, poudres, feuilles, fluides ou préformes en pièces profilées intermédiaires ou finales ; et 3) traitements de finition. On utilise des broyeurs pour réduire les pièces rejetées et les rebuts non dégradés ni contaminés en pastilles pouvant repasser dans l'extrudeuse (mélangées avec une charge fraîche).

Après incorporation des additifs nécessaires, le mélange de plastique est formé pour créer un produit intermédiaire ou final. Différents procédés de moulage sont utilisés pour former des produits plastiques à l'état solide. Ces procédés sont décrits ci-après.

Moulage par injection : Les granulés de plastique sont chauffés et homogénéisés au moyen d'une vis d'Archimède tournant dans un cylindre chauffé (le fût), qui pompe également le polymère fondu vers l'extrémité de la vis. Une fois que l'on a obtenu suffisamment de fluide, un béliet hydraulique l'injecte dans un moule relativement froid. Le plastique prend la forme du moule en se solidifiant.

Extrusion : Les pastilles ou granulés de plastique sont fluidisés, homogénéisés et formés en continu à mesure que l'extrudeuse les force à travers une filière. L'extrusion est souvent suivie d'un autre traitement (gonflage, thermoformage ou poinçonnage).

Moulage par soufflage : Dans ce procédé, un tube de plastique extrudé appelé paraison est maintenu dans un moule creux et de l'air comprimé est injecté pour plaquer le plastique encore en fusion aux parois du moule. Après le formage, le produit solide est retiré du moule.

Les films plastiques sont formés par extrusion d'un tube qui est ensuite gonflé pour s'élever verticalement en en fin fil en bulle, puis refroidi et aplati au rouleau en vue de transformations ultérieures.

Thermoformage : Le plastique en feuilles est placé sur un moule, dont il épouse la forme par application de chaleur et pression (ou vide).

Moulage par rotation : De fines poudres de plastique sont chauffées dans un moule en rotation pour obtenir une matière fondue à faible viscosité. Lorsque la résine fondue s'est déposée sur toute la surface interne du moule pour former une couche uniforme, le moule est refroidi et on obtient une pièce creuse sans bavures.

Moulage par compression et transfert : De la poudre de plastique ou une pièce préformée est placée dans un moule et

comprimée par application de chaleur et de pression pour prendre la forme de la cavité. Le moulage par transfert est un procédé similaire, à ceci près que le plastique est liquéfié dans une chambre puis injecté dans un moule fermé par un piston hydraulique.

Calandrage: Les pièces de plastique sont écrasées entre deux cylindres pour former un film fin qui se déroule en continu.

Procédés de fabrication réactifs

Pour la fabrication de plastiques thermodurcissables, des résines liquides sont mélangées avec un catalyseur. Le mélange est ensuite durci pour obtenir un produit fini. Une fois durcie, la pièce peut subir des traitements de finition mais sa forme ne peut être modifiée. Les résines utilisées pour la fabrication de thermodurcissables sont l'uréthane, la résine époxy, le polyester et les résines acryliques, phénoliques et aminiques. Des matières de charge et additifs sont incorporés au mélange résine-catalyseur avant le moulage pour améliorer la résistance et autres caractéristiques du produit ainsi que pour réduire son coût. La plupart des plastiques thermodurcissables sont très chargés (jusqu'à 70 % de charge en poids). On utilise généralement des fibres minérales, de l'argile, des fibres de verre, des fibres ligneuses et du noir de carbone comme matière de charge. Plusieurs autres ingrédients sont incorporés, tels que durcisseurs, promoteurs, diluants réactifs et pigments.

Différents procédés de moulage peuvent être utilisés pour obtenir un produit thermodurcissable intermédiaire ou final, notamment : moulage sous vide, moulage par compression, moulage par rotation, lamination manuelle, coulage et encapsulage, lamination par pulvérisation, moulage par transfert de résine, moulage par enroulement filamentaire, moulage par injection et réaction, et pultrusion.

Plastiques alvéolaires

La fabrication des plastiques alvéolaires fait appel à des procédés de formage légèrement différents de ceux décrits plus haut. Il y a trois types de plastiques alvéolaires : mousses gonflées, mousses syntactiques et mousses structurées. La mousse gonflée est une matrice expansée qui a la structure d'une éponge naturelle. La mousse syntactique est formée de microsphères creuses organiques ou inorganiques encapsulées dans la matrice, et la mousse structurée est un plastique de composition alvéolaire au centre et solide à l'extérieur.

Les trois types de mousses peuvent être fabriquées en utilisant un procédé de moulage par injection, extrusion ou compression qui permet d'obtenir des plastiques alvéolaires de formes aussi variées que les plastiques solides. Les mousses structurées sont fabriquées par injection de résines liquides contenant des gonflants chimiques. Une fois que le plastique alvéolaire ou solide est formé, il est soumis à un traitement de finition tel que soudage, collage, usinage et décoration de surface (à la peinture par exemple).

Caoutchoucs

Malgré la diversité des procédés de fabrication des caoutchoucs, il existe plusieurs procédés de base décrits ci-dessous.

Mélangeage : Le procédé de fabrication commence par l'élaboration d'un mélange de polymères (caoutchouc naturel et/ou synthétique), de noir de carbone (la principale matière de charge d'un mélange caoutchouteux), d'huiles et différents composés chimiques tels qu'adjuvants, agents vulcanisants, activateurs, accélérateurs de vulcanisation, agents anti-oxygène, liants, adoucissants et autres produits spéciaux (retardateurs, colorants, gonflants, agents anti-poussière, agents anti-odeurs, etc.).

Les mélanges caoutchouteux varient selon les caractéristiques recherchées dans le produit final. Les ingrédients appropriés

sont pesés et versés dans un mélangeur fermé appelé Banbury. L'endroit où les substances chimiques sont pesées et versées dans le mélangeur s'appelle l'aire de mélangeage. Les polymères et autres substances chimiques sont introduits manuellement dans la hotte du mélangeur, alors que le noir de carbone et les huiles sont souvent transférés directement de l'installation de stockage en vrac dans la chambre de mélange. Après le mélangeage, le caoutchouc est refroidi.

Calandrage : Le mélange caoutchouteux est déversé dans une machine qui l'aplatit en forme de bande ou de feuille allongée. Le caoutchouc chaud et poisseux passe ensuite à travers une solution aqueuse « anti-colle » pour empêcher les feuilles de coller ensemble pendant le séchage à température ambiante. Les feuilles de caoutchouc sont placées directement sur un long tapis roulant où elles sont refroidies à l'eau ou à l'air frais. Après le refroidissement, les feuilles sont dirigées vers une autre machine qui réchauffe le caoutchouc pour l'extrusion et le calandage. Certaines extrudeuses peuvent fonctionner à froid, ce qui rend cette étape inutile.

Extrusion : Le caoutchouc est formé ou profilé dans une extrudeuse qui l'entraîne vers une filière au moyen d'une vis tournante. L'extrusion chauffe le caoutchouc, qui reste chaud jusqu'à ce qu'il soit refroidi dans un bain-marie ou sur un tapis roulant de refroidissement par pulvérisation.

Calandrage: Les bandes de caoutchouc chaud sont acheminées vers une calandre qui les plaque sur des fibres de renforcement ou des matrices de fibres de toile pour former de fines feuilles de matériau enduit de caoutchouc. Les calandres servent également à fabriquer des feuilles de caoutchouc non renforcé d'épaisseur contrôlée.

Assemblage: Après l'extrusion et le calandrage, les feuilles de caoutchouc sont superposées ou combinées avec du fil métallique, du polyester, des fibres aramides et autres

matériaux de renfort pour obtenir différents produits en caoutchouc. On utilise dans certains cas des adhésifs appelés ciments pour renforcer l'adhésion entre les différentes couches, ou des solvants qui rendent rugueuse la surface du caoutchouc pour qu'elle adhère mieux. Les produits combinés métal / caoutchouc (pièces de suspension automobile, bâtis moteur) sont également fabriqués durant cette phase.

Vulcanisation : La plupart des produits en caoutchouc doivent être vulcanisés ou réticulés. Cette opération s'effectue dans un moule à compression chauffé, une enceinte sous pression de vapeur (autoclave), un four à air chaud et micro-ondes, ou différents systèmes à lit fluidisé et à liquide fondu. La pièce assemblée (un pneu, par exemple) est maintenue à haute température, dans un moule, pour permettre la vulcanisation une fois que la pièce a pris la forme du moule. Durant le traitement, les chaînes de polymères dans la matrice de caoutchouc se relient entre elles pour former un produit durable, élastique et thermodurcissable. Ce sont ces liaisons transversales dans la matrice qui confèrent au caoutchouc ses propriétés d'élasticité réversible.

Finissage : Les traitements de finissage servent à préparer les pièces en vue de leur utilisation finale. Pour les pneus, le finissage comprend l'équilibrage, le meulage, l'impression, le lavage, l'essuyage et le brossage.

Techniques au latex trempé

Les produits en caoutchouc tels que gants, cathéters et autres appareils chirurgicaux sont fabriqués par trempé dans du latex de caoutchouc naturel isoprène. La concentration du latex se fait par centrifugation, évaporation, crémage et électro-décantation. Des substances synthétiques ayant la consistance et la souplesse du latex naturel ont été développées, notamment pour la fabrication de gants : caoutchouc nitrile, latex synthétique (qui ne contient pas de protéines), chlorure de

polyvinyle (PVC), élastomères styréniques, polyuréthane et silicone.

Pour le latex de caoutchouc naturel ou synthétique, des ingrédients auxiliaires (agents de vulcanisation, accélérateurs de vulcanisation, activateurs, retardateurs, auto-oxydants, stabilisants, épaississants et coagulants) doivent être mélangés avec le latex pour conférer au produit les propriétés voulues.