

# **Projet d'orientations concernant les meilleures techniques disponibles et les meilleures pratiques environnementales**

Procédés de fusion et de grillage utilisés  
dans la production de métaux non ferreux  
(plomb, zinc, cuivre et or industriel  
comme spécifié à l'Annexe D de la  
Convention).

# **Procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production de métaux non ferreux (plomb, zinc, cuivre et or industriel comme spécifié à l'Annexe D de la Convention).**

## **Sous-groupe de la fusion des métaux non ferreux (cuivre, or, plomb et zinc)**

### **Orientations et études de cas des MTD/MPE**

#### **Résumé**

L'objet principal du procédé de fusion est de convertir en métaux purs des concentrés métalliques dans leur état initial; de ce fait, la fusion est une forme de métallurgie extractive. Les métaux sont communément présents dans la nature sous forme d'oxydes, de sulfures ou de carbonates. Le procédé de fusion est fondé sur une réaction chimique qui libère le métal en présence d'un agent réducteur. On trouve le mercure sous forme de traces dans quasiment toutes les matières premières métallurgiques. Le procédé thermique peut libérer ce mercure dans l'atmosphère.

La production de métaux en général, et la production de métaux non ferreux en particulier, est une importante source anthropique d'émissions de mercure et représenterait environ 10 % des émissions mondiales. Il est admis que cette estimation comporte une marge d'incertitude considérable et qu'il sera indispensable d'obtenir des données spécifiques à chaque site pour traiter le mercure localement au niveau de chaque installation.

Le présent chapitre fournit des orientations sur les options de contrôle du mercure provenant du secteur des métaux non ferreux (en particulier, le cuivre, le zinc, le plomb et l'or industriel, comme indiqué dans la Convention). Il vise à offrir aux Parties à la Convention de Minamata des orientations pour identifier les meilleures techniques disponibles (MTD) et les meilleures pratiques environnementales (MPE) leur permettant de s'acquitter de leurs obligations au titre de la Convention.

Les orientations concernent uniquement les émissions issues des procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production des métaux non ferreux susmentionnés. D'autres procédés comme les procédés hydrométallurgiques peuvent aussi produire des émissions de mercure, mais ne figurent pas dans l'annexe D de la Convention, raison pour laquelle ces procédés ne sont pas abordés dans les présentes orientations.

La fusion secondaire des métaux de type non ferreux produit généralement des niveaux négligeables d'émission de mercure, car ces procédés de recyclage des métaux utilisent des déchets métalliques et des scories en tant que matières premières. La fusion secondaire des déchets électroniques pourrait constituer une exception, mais les techniques utilisées pour réduire les émissions de la fusion secondaire ne sont probablement pas très différentes de celles utilisées pour la fusion primaire.

Le chapitre présente les procédés nécessaires pour la production des métaux concernés par les orientations (cuivre, zinc, plomb et or industriel). Il couvre des techniques de contrôle, y compris les techniques spécialement conçues pour contrôler les émissions de mercure, mais aussi des techniques de contrôle d'autres polluants susceptibles de participer à la réduction des émissions de mercure. Il décrit les nouvelles techniques et fournit des orientations sur les MTD et les MPE. Des informations sur la surveillance spécifique au secteur des métaux non ferreux sont également fournies.

# Table des matières

<b>Procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production de métaux non ferreux (plomb, zinc, cuivre et or industriel comme spécifié à l'Annexe D de la Convention).</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2 Descriptions des procédés</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Étapes du procédé de production de plomb</i>	6
2.1.1 Prétraitement des concentrés	6
2.1.2 Fusion	6
2.1.3 Affinage	6
2.1.4 Unité de production d'acide sulfurique	6
2.2 <i>Étapes du procédé de production de zinc</i>	8
2.2.1 Mélange, grillage et récupération des poussières	8
2.2.2 Épuration du gaz	8
2.2.3 Unité de production d'acide sulfurique	9
2.2.4 Lixiviation	10
2.3 <i>Étapes du procédé de production de cuivre</i>	10
2.3.1 Séchage des concentrés	10
2.3.2 Grillage	10
2.3.3 Fusion	10
2.3.4 Convertissage	11
2.3.5 Affinage et coulage	11
2.3.6 Lavage du laitier	11
2.3.7 Unité de production d'acide sulfurique	11
2.4 <i>Étapes du procédé de production d'or</i>	12
2.4.1 Grillage	12
2.4.2 Lixiviation	13
2.4.3 Extraction et régénération	13
2.4.4 Affinage	13
<b>3 Techniques de contrôle des émissions</b>	<b>14</b>
3.1 <i>Procédé de Boliden Norzink</i>	15
3.1.1 Description	15
3.1.2 Applicabilité	16
3.1.3 Performance	16
3.1.4 Effets croisés entre différents milieux	17
3.1.5 Coûts d'installation et d'exploitation	17
3.2 <i>Filtre à sélénium</i>	17
3.2.1 Description	17
3.2.2 Applicabilité	18
3.2.3 Performance	18
3.2.4 Coûts d'installation et d'exploitation	18
3.2.5 Effets croisés entre différents milieux	18
3.3 <i>Charbon actif</i>	19
3.3.1 Description	19
3.3.2 Applicabilité	19
3.3.3 Performance	19
3.3.4 Coûts d'installation et d'exploitation	19
3.3.5 Avantages connexes	20
3.3.6 Effets croisés entre différents milieux	20
3.4 <i>Procédé utilisant un filtre DOWA (filtre en pierre ponce recouvert de sulfure de plomb [II])</i>	20
3.5 <i>Procédé de Jerritt</i>	20

3.5.1	Description	20
3.5.2	Applicabilité	21
3.5.3	Performance	21
3.5.4	Effets croisés entre différents milieux	21
3.5.5	Coûts d'installation et d'exploitation	21
3.6	<i>Avantages connexes des techniques d'élimination de la pollution atmosphérique et des unités de production d'acide pour le contrôle du mercure</i>	22
3.6.1	Techniques d'élimination de la pollution	22
3.6.2	Combinaison d'unités d'épuration de gaz et d'unités de production d'acide	23
<b>4</b>	<b>Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales</b>	<b>24</b>
4.1	<i>Présentation des MTD</i>	24
4.1.1	<i>Autres considérations pour le choix du procédé de contrôle du mercure lors de la fusion et du grillage dans le secteur des métaux non ferreux</i>	26
4.2	<i>Meilleures pratiques environnementales</i>	29
4.2.1	Systèmes de gestion environnementale	29
4.2.2	Mélange de charges pour contrôler les émissions de mercure	29
4.2.3	Émissions atmosphériques de mercure	30
4.2.4	Contrôle des matières particulaires	30
4.2.5	Gestion écologiquement rationnelle et mise au rebut des déchets du contrôle de la pollution atmosphérique	30
<b>5</b>	<b>Surveillance du mercure dans les procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production de métaux non ferreux</b>	<b>31</b>
5.1	<i>Méthodes de mesure directe</i>	31
5.1.1	Prélèvement par impacteur	31
5.1.2	Pièges adsorbants et leurs systèmes de surveillance	31
5.1.3	Systèmes de surveillance en continu des émissions	31
5.2	<i>Méthodes de mesure indirecte</i>	32
5.2.1	Bilan massique	32
5.2.2	Systèmes de surveillance prédictive des émissions	32
5.2.3	Coefficients d'émission	32
<b>6</b>	<b>References</b>	<b>33</b>

## 1. Introduction

On trouve le mercure sous forme d'éléments traces dans quasiment toutes les matières premières métallurgiques. De ce fait, le traitement thermique et d'autres opérations de fusion sont susceptibles de libérer du mercure dans l'atmosphère. L'objet principal du procédé de fusion est de convertir des minerais métalliques en métaux purs; de ce fait, la fusion est une forme de métallurgie extractive. Les métaux sont communément présents dans la nature sous forme d'oxydes, de sulfures ou de carbonates; le procédé de fusion est fondé sur une réaction chimique qui libère le métal en présence d'un agent réducteur.

Le Rapport du PNUE sur l'évaluation mondiale du mercure 2013 (AMAP/UNEP 2013) présente un inventaire des émissions pour l'année 2010 qui, même s'il est fondé sur l'inventaire de 2005 figurant dans un rapport de 2008 du PNUE (AMAP/UNEP 2008) dont il s'inspire et auquel il ressemble globalement, présente de nombreuses différences significatives dans plusieurs secteurs clés. Les données de ces deux inventaires montrent que la production de métaux en général, et la production de métaux non ferreux en particulier, est une importante source anthropique d'émissions de mercure et représenterait environ 10 % des émissions mondiales. Il est admis que cette estimation comporte une marge d'incertitude considérable et qu'il sera indispensable d'obtenir des données spécifiques à chaque site pour traiter le mercure localement au niveau de chaque installation.

Les présentes orientations concernent les options de contrôle du mercure provenant du secteur des métaux non ferreux (en particulier, le cuivre, le zinc, le plomb et l'or industriel, comme indiqué dans la Convention). Leur but est d'offrir aux Parties à la Convention de Minamata des orientations pour identifier les meilleures techniques disponibles (MTD) et les meilleures pratiques environnementales (MPE) leur permettant de s'acquitter de leurs obligations au titre de la Convention.

Les orientations concernent uniquement les émissions issues des procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production des métaux non ferreux susmentionnés. D'autres procédés comme les procédés hydrométallurgiques peuvent aussi produire des émissions de mercure, mais ne figurent pas dans l'annexe D de la Convention et ne sont donc pas concernés par les présentes orientations.

La fusion secondaire des métaux produit généralement des niveaux négligeables d'émission de mercure, car ce sont en fait des procédés de recyclage des métaux qui utilisent des déchets métalliques et des scories en tant que matières premières. Le seul cas où de petites quantités de mercure pourraient être libérées est le recyclage de piles au zinc qui contiennent des traces de cet élément. Étant donné les exigences du traité relatives aux produits (soumis à l'article 4, avec la teneur en mercure autorisée des piles boutons zinc-oxyde d'argent, définie dans l'annexe A), la teneur en mercure des piles devrait aussi considérablement diminuer.

Ce constat est corroboré par les données disponibles sur les émissions de mercure provenant de fonderies secondaires. Par exemple, l'Agence américaine de protection de l'environnement a exigé des essais sur les émissions de mercure provenant de plusieurs fonderies de plomb secondaires aux États-Unis en 2010 et a constaté que dans près de 70 % des cas, les émissions se situaient sous la limite de détection.

Dans certains cas, la fusion secondaire de composants électroniques peut produire d'importantes émissions de mercure. Dans ces cas, on utilise cependant en général du charbon actif pour réduire les émissions. Par conséquent, la fusion secondaire n'est pas traitée à part dans les présentes orientations.

## 2 Descriptions des procédés

La configuration des opérations de fusion et de grillage dépend des conditions du site et des propriétés spécifiques des minerais ou des concentrés traités. Ces opérations comprennent souvent plusieurs étapes. Cette section propose une description générale et succincte des procédés de fusion et de grillage pertinents pour les secteurs du plomb, du zinc, du cuivre et de l'or industriel.

La première étape du traitement des minerais de plomb, de zinc et de cuivre est la production de concentrés. Les concentrés sont souvent initialement traités à l'aide d'un procédé thermique à haute température comme le grillage, le frittage ou la fusion. La haute température entraîne la volatilisation du mercure qui est donc présent dans les gaz d'échappement.

Dans ces gaz, le mercure est adsorbé sur les matières particulaires ou est présent sous forme de composés solubles (par exemple, chlorure mercurique) et aussi sous forme de mercure élémentaire. On peut normalement piéger les espèces de mercure oxydées en utilisant des laveurs et des électrofiltres humides. Le mercure oxydé fixé sur des particules peut être piégé à l'aide de filtres à manches. Cependant, le mercure élémentaire traverse tous les équipements standards d'épuration des gaz. Il peut donc être nécessaire d'avoir recours à une deuxième étape de piégeage du mercure (s'il est présent dans le minerai) afin de réduire la concentration de cet élément à des niveaux acceptables. Les options disponibles sont présentées dans la section 3.

La principale raison pour laquelle le mercure élémentaire ne peut pas être efficacement éliminé du flux gazeux à température ambiante par un lavage à l'eau seule est sa faible solubilité dans l'eau. Une possibilité de contourner ce

problème consiste à adsorber le mercure sur des sorbants comme le charbon actif. Une autre consiste à oxyder le mercure d'une manière adéquate, afin de pouvoir le collecter en solution ou sous la forme d'un composé solide.

Lors du traitement de matières premières sulfurées, le gaz contient du dioxyde de soufre qui est normalement utilisé pour produire de l'acide sulfurique. Afin que l'acide sulfurique réponde aux normes commerciales, sa concentration en mercure doit être réduite; la limite autorisée est variable en fonction de l'utilisation ultime de l'acide.

Les techniques visant à réduire les émissions de mercure issues de la fusion ou du grillage dans le secteur des métaux non ferreux peuvent aussi entraîner la production de matériaux contenant du mercure. On peut citer en exemple le calomel (chlorure mercurieux) produit par le procédé Boliden-Norzink (voir section 0). Les présentes orientations ne concernent pas le traitement de ces matériaux, mais selon l'article 11 de la Convention, ces derniers doivent être entreposés ou mis au rebut d'une manière écologiquement rationnelle en tant que déchets.

Le mercure peut également être présent dans les eaux usées résultant de ces procédés, qui doivent faire l'objet d'un entreposage ou d'un traitement similaire. Les eaux usées provenant de différentes sections des installations sont généralement traitées en vue d'en éliminer les éléments nocifs, comme les métaux lourds, les huiles résiduelles ou les traces de réactifs chimiques. Le mercure est souvent précipité pour former du sulfure de mercure très peu soluble et éliminé par décantation et filtration. Les boues finales de la station de traitement des eaux usées devraient être correctement entreposées comme des déchets. Il convient de traiter les boues contenant du mercure d'une manière écologiquement rationnelle, conformément à d'autres articles pertinents de la Convention.

## **2.1 Étapes du procédé de production de plomb**

Le procédé primaire de production de plomb comprend trois étapes principales : prétraitement du concentré, frittage ou fusion, et affinage. Il est schématisé dans la Figure 1. La libération de mercure a principalement lieu au cours du frittage et de la fusion. Ce mercure doit être piégé afin de réduire à un minimum les émissions au niveau de la dernière cheminée.

### **2.1.1 Prétraitement des concentrés**

Lors de l'étape de prétraitement des concentrés, plusieurs concentrés de plomb sont mélangés de manière à former une matière de base homogène pour le procédé de fusion. Le mélange de concentrés permet d'obtenir une teneur en métal plus constante dans la charge et de réduire les pics d'impuretés susceptibles de nuire au procédé ou à l'environnement, ou de provoquer des problèmes de qualité du produit. Pendant le mélange, il est nécessaire d'ajouter d'autres matières premières, par exemple des flux ou des matières particulières récupérées en aval dans les appareils de contrôle de la pollution. En fonction des exigences du procédé, le mélange de concentrés de plomb peut être déshydraté afin d'en réduire la teneur en eau. Des émissions de mercure peuvent se produire pendant la déshydratation sous forme de mercure gazeux ou de matières particulières.

### **2.1.2 Fusion**

Il existe deux procédés principaux pour la fusion des concentrés de plomb. Le procédé traditionnel consiste en un premier frittage du mélange de concentrés de plomb dans le but d'éliminer le soufre et de produire de l'oxyde de plomb. Le produit du frittage de l'oxyde de plomb est ensuite introduit dans un haut fourneau où, à l'aide de coke, il est réduit en plomb d'œuvre.

Le second procédé, plus récent, est la fusion directe des concentrés de plomb (également connu sous le nom de fusion éclair). Avec la fusion directe, l'oxydation et la réduction du plomb s'opèrent au sein d'un même fourneau. La chaleur générée par l'oxydation du soufre présent dans le concentré permet la réaction de réduction ultérieure et la production de plomb d'œuvre à l'aide de charbon. Comparée au procédé de fusion en haut fourneau, la fusion directe consomme moins d'énergie et produit moins d'émissions atmosphériques en raison d'une plus grande étanchéité et d'un meilleur piégeage du gaz résiduel.

Ce gaz résiduel issu du procédé de frittage ou de fusion directe contient des matières particulières, du dioxyde de soufre, du mercure et d'autres impuretés. Il doit être lavé avant la production d'acide sulfurique.

### **2.1.3 Affinage**

Le plomb d'œuvre est affiné en plusieurs étapes de traitement pyrométallurgique afin d'éliminer les autres métaux et les impuretés. Pendant l'étape de démattage, le plomb d'œuvre est refroidi dans une cuve jusqu'à la formation d'écume à la surface. L'écume, qui contient de l'oxyde de plomb et d'autres métaux, est prélevée et traitée ailleurs en vue de récupérer les métaux. Le plomb d'œuvre est encore affiné par l'ajout, à des étapes différentes, de divers réactifs permettant d'éliminer des impuretés métalliques spécifiques. Le plomb pur final peut être moulé pour obtenir différentes formes ou mélangé avec d'autres métaux pour former des alliages. L'affinage du plomb peut aussi être réalisé selon une technique d'électro-affinage produisant des cathodes en plomb pur. On ne pense pas que le procédé d'affinage génère d'importantes émissions de mercure.

### **2.1.4 Unité de production d'acide sulfurique**

Le gaz résiduel des fonderies ou installations de frittage est traité en vue d'en éliminer les matières particulaires et la plus grande partie des métaux, y compris le mercure, à l'aide de dispositifs d'épuration tels que des laveurs et des électrofiltres. Si sa teneur en mercure reste importante, on le soumet à une étape de piégeage du mercure qui élimine celui-ci en tant que déchet. Le traitement des matériaux contenant du mercure, y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce, doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

Après piégeage du mercure, le gaz contient une concentration élevée de dioxyde de soufre qui est généralement converti en acide sulfurique dans une unité de production d'acide. Tout le mercure restant est contenu dans l'acide. Une concentration en mercure inférieure à 1 ppm est toutefois spécifiée pour les acides de qualité commerciale, ce qui signifie qu'il est nécessaire d'éliminer efficacement le mercure en amont de l'unité de production. Au niveau de la dernière cheminée, les émissions ne devraient contenir que des concentrations infimes de mercure.

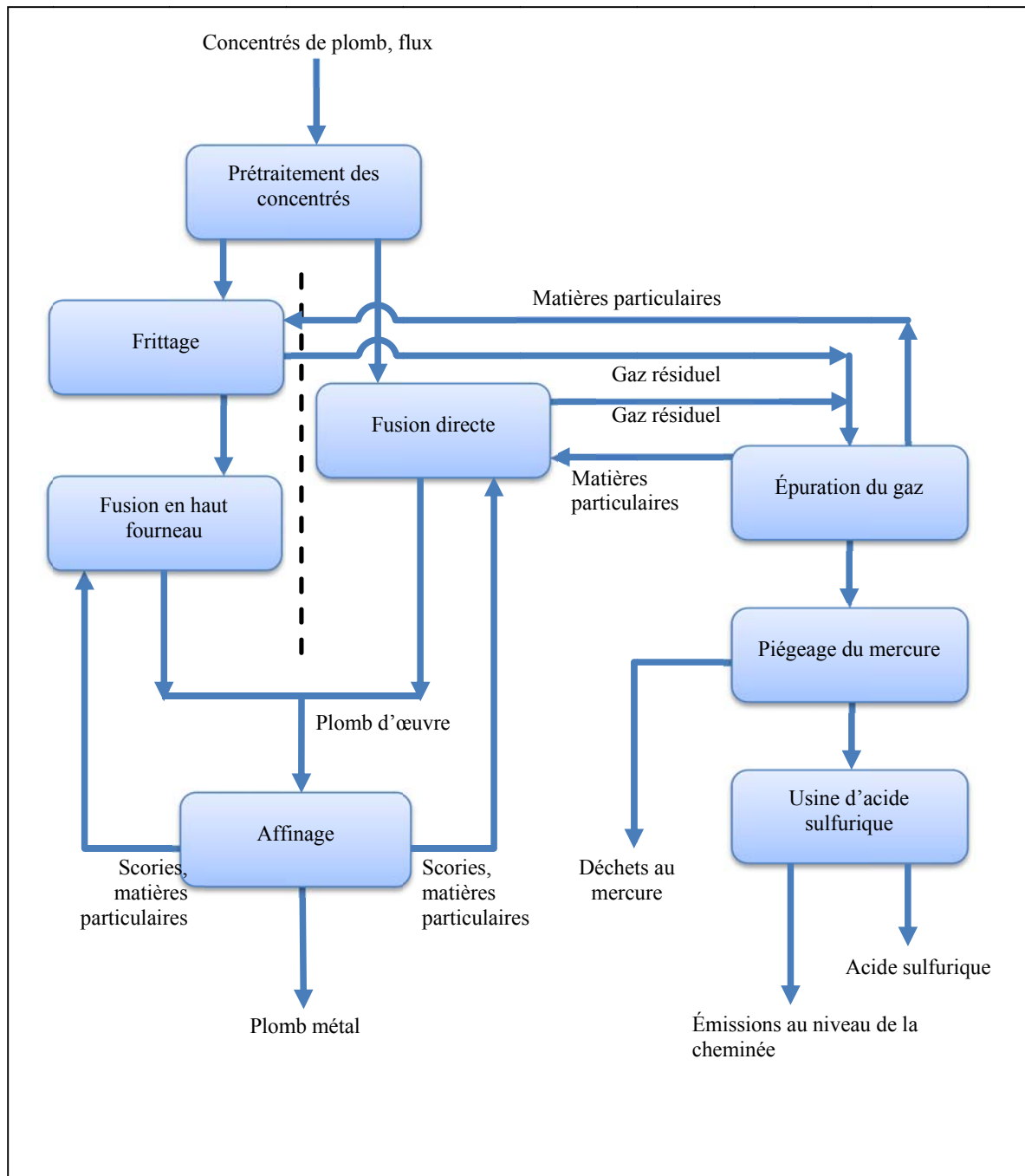


Figure 1 : Procédés de production primaire de plomb

## **2.2 Étapes du procédé de production de zinc**

Le procédé de production primaire de zinc comprend cinq étapes principales : mélange des concentrés, grillage ou frittage et fusion, lixiviation et purification, extraction électrolytique, et fusion et alliage. Le procédé est schématisé dans la Figure 2. La libération de mercure a principalement lieu au cours du grillage. Ce mercure doit être piégé afin de réduire à un minimum les émissions au niveau de la dernière cheminée.

### **2.2.1 Mélange, grillage et récupération des poussières**

Les différentes étapes du procédé de production de zinc sont schématisées dans la Figure 2. Pour des motifs commerciaux et logistiques, chaque affinerie de zinc achète des concentrés de zinc auprès de plusieurs mines différentes. La teneur en mercure d'un gisement donné peut varier de 1 à 200 ppm, mais peut atteindre 1 000 ppm. Pour que le fonctionnement soit harmonieux, efficace et écologique, le taux de toutes les impuretés, y compris le mercure, introduites dans le procédé de production de zinc est contrôlé. Le mélange de concentrés de qualité différente est un procédé bien établi de préparation des matières premières. Il permet d'éviter des pics d'impuretés inattendus, susceptibles de nuire au procédé ou à l'environnement ou de provoquer des problèmes de qualité du produit.

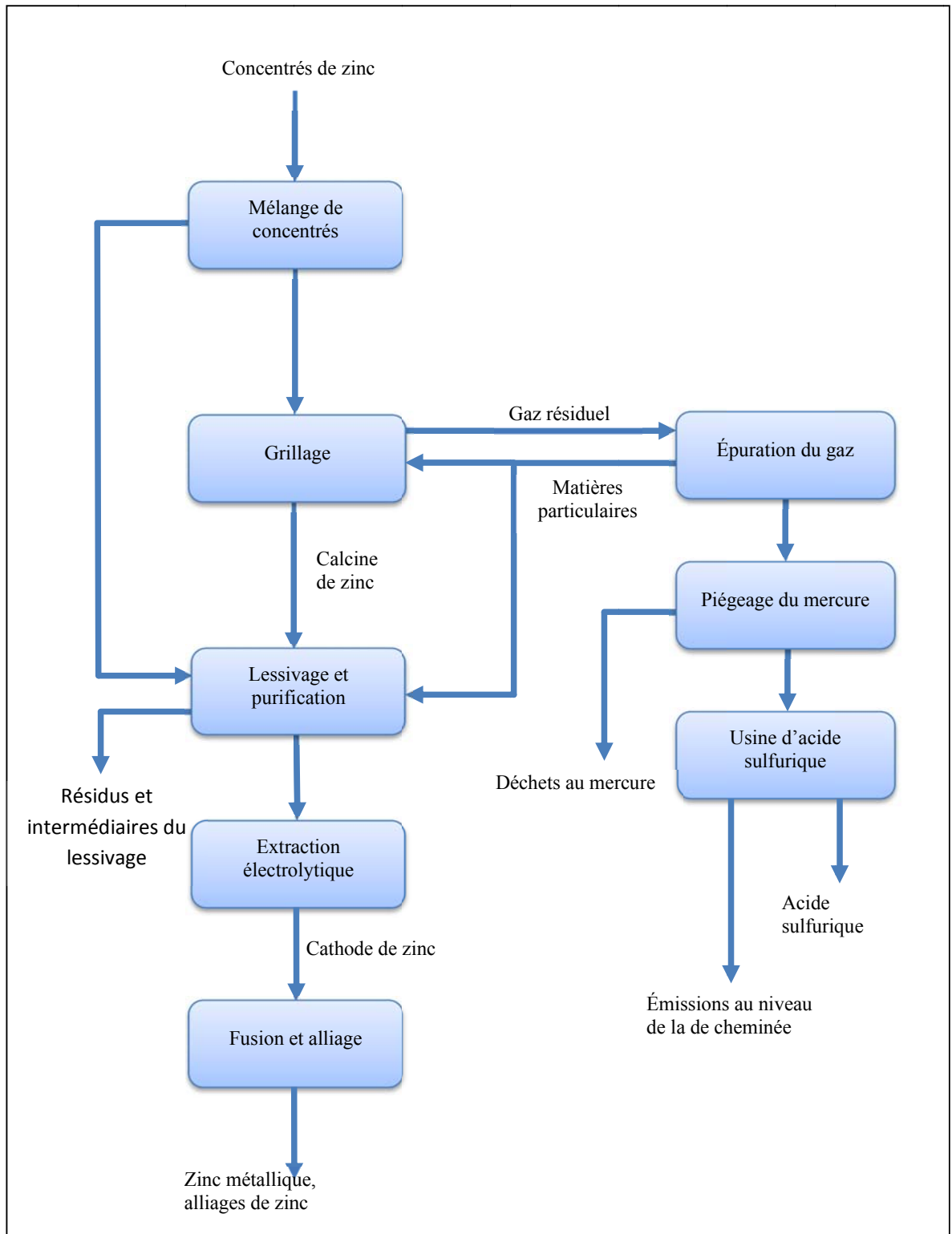
Les concentrés de zinc sont grillés par injection dans un four à lit fluidisé à 950 °C, ce qui entraîne la transformation (grillage) des sulfures en oxydes et SO<sub>2</sub> gazeux. Le four fonctionne sous pression négative pour éviter les émissions diffuses. Quasiment tous les composés du mercure présents dans les concentrés y sont vaporisés. Les poussières, aussi appelées matières particulaires, sont récupérées dans le flux gazeux et acheminées vers la section de lixiviation, de même que les oxydes de zinc issus du grillage. Le gaz est acheminé vers l'étape d'épuration.

À défaut, dans le procédé Imperial Smelting, les concentrés de zinc ou concentrés en vrac contenant du zinc et du plomb sont d'abord frittés, puis fondus dans un four Imperial Smelting (ISF) (Morgan 1968).

### **2.2.2 Épuration du gaz**

Lors de l'épuration du gaz par voie humide, les dernières traces de poussière sont piégées à l'aide d'appareils de réduction des matières particulaires, par exemple des laveurs et des électrofiltres. Les eaux usées provenant de cette étape contiennent du mercure et d'autres métaux lourds; elles sont traitées dans une installation idoine ou injectées dans un four de grillage afin d'optimiser la collecte du mercure par le procédé dédié de piégeage du mercure, dont il existe différents types qui sont décrits plus loin. Ces unités spécifiques de piégeage du mercure abaissent les concentrations de mercure à de faibles niveaux. Le résultat de ce procédé d'élimination est un concentré de mercure qui contient environ 50 à 90 % du mercure total initial.





**Figure 2 : Procédés de production primaire de zinc**

### 2.2.3 Unité de production d'acide sulfurique

Après piégeage du mercure, le  $\text{SO}_2$  provenant du gaz est transformé en acide sulfurique. Environ 90 % du mercure résiduel présent dans le flux gazeux est piégé dans l'acide. Pour être considéré comme étant de qualité commerciale, celui-ci doit avoir une teneur en mercure inférieure à 1 ppm. Les quantités de mercure aboutissant dans l'acide représentent moins de 2 % du total initial. Lorsque des contrôles sont en place, les émissions au niveau de la cheminée sont généralement inférieures à 0,1 ppm ou à  $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , soit moins de 0,25 % du mercure présent à l'entrée.

## 2.2.4 Lixiviation

Lors de l'étape de lixiviation, le concentré de zinc oxydé (dénommé « calcine ») est dissous dans de l'acide. La solution est purifiée par cémentation sur de la poudre de zinc métal (poudre) dépourvue de mercure et acheminée vers le poste d'électrolyse en vue de récupérer le zinc métal. D'autres métaux, par exemple, du cuivre, du cadmium, du plomb, de l'argent, du cobalt et du nickel sont récupérés dans des fractions séparées qui sont ultérieurement affinées dans d'autres installations. Un résidu final de la lixiviation, contenant essentiellement du fer sous forme de jarosite, de goethite ou d'hématite, ainsi que du sulfate et des silicates de plomb, nécessite un traitement conforme aux articles pertinents de la Convention. Souvent, le résidu de la lixiviation, qui peut contenir du mercure, est recyclé dans un procédé de fusion du plomb.

Lors de la lixiviation, il peut aussi y avoir un apport direct de concentrés de minerais non grillés qui contiennent du mercure. La quantité de concentrés non grillés introduits dans le procédé de lixiviation équivaut généralement à environ 10 % du total des concentrés introduits, mais peut atteindre 50 % dans le cas de la lixiviation directe. Le mercure provenant de ces concentrés non grillés aboutit dans le résidu de lixiviation sous forme de sulfure de mercure quasiment insoluble. Étant donné que le mercure n'est pas dissous, il n'y a pas d'émission atmosphérique lors du procédé de lixiviation. En fonction de la quantité de concentrés non grillés présente dans cette étape du procédé, on retrouve environ 5 à 50 % du mercure initial dans ce résidu de la lixiviation.

## 2.3 Étapes du procédé de production de cuivre

On peut produire le cuivre primaire par pyrométallurgie ou hydrométallurgie. Environ 20 à 25 % du cuivre primaire sont obtenus par des techniques comme la lixiviation de minerais de type oxydes. Le reste de la production de cuivre primaire utilise le procédé pyrométallurgique. Étant donné que le procédé hydrométallurgique ne fait intervenir aucun grillage ni fusion, il n'est pas couvert par l'annexe D de la Convention de Minamata et n'entre pas dans le cadre du présent document d'orientation.

Les minerais de cuivre traités par pyrométallurgie sont sulfurés. Dans ce procédé, le mercure présent dans le concentré est libéré dans le gaz de procédé, principalement au cours de la fusion et du convertissage de la matte. En fonction de la température utilisée dans les sècheurs, le mercure peut également être libéré pendant le séchage dans les installations qui utilisent un sécheur de concentrés.

Les différents procédés pyrométallurgiques parallèles utilisés dans la production de cuivre sont schématisés dans la Figure 3 :

- Grillage, fusion et convertissage;
- Fusion et convertissage;
- Directement vers la fusion du cuivre.

### 2.3.1 Séchage des concentrés

Le procédé pyrométallurgique commence par le mélange de concentrés et de flux pour produire une matière première stable et homogène, en particulier lors du traitement de concentrés ayant des concentrations variables en cuivre ou en impuretés. Dans le cas des cuves de fusion éclair, les concentrés mélangés sont alors séchés pour réduire leur teneur en eau à 0,2 %, généralement à l'aide de sècheurs rotatifs, à bobines multiples ou à lit fluidisé, fonctionnant avec une température de sortie comprise entre 100 °C et 200 °C. Le concentré sec est ensuite acheminé vers la cuve de fusion; les poussières suspendues dans le gaz provenant du séchoir sont piégées dans des filtres à manches ou des électrofiltres. Dans les installations utilisant des techniques IsaSmelt ou similaires, le mélange de concentrés n'est pas séché avant d'être introduit dans la cuve de fusion et converti en mélange fondu de matte-laitier.

### 2.3.2 Grillage

Des techniques plus anciennes peuvent encore être utilisées lorsque les concentrés sont grillés avant la fusion. Dans les installations faisant appel à ce procédé, le mélange de concentrés est d'abord grillé en vue de convertir les sulfures de cuivre en oxydes avant de les traiter dans la fonderie. Le gaz du procédé de grillage qui contient du dioxyde de soufre et un peu de mercure est traité à l'aide de laveurs de gaz et de électrofiltres pour en éliminer les matières particulaires. Il est ensuite acheminé vers l'unité de production d'acide.

### 2.3.3 Fusion

Après séchage, le mélange de concentrés et de flux est fondu pour produire une matte (ou moins souvent du cuivre blister), généralement en atmosphère enrichie en oxygène, dans un four de fusion. Il existe plusieurs types de procédés de fusion du cuivre, dont la fusion éclair et la fusion au bain. Un autre procédé qui n'est pas représenté dans la figure 3 fait intervenir une étape de fusion continue dans des fours multiples et une étape de convertissage aboutissant à du cuivre blister.

La fusion éclair est largement utilisée, étant donné qu'il s'agit d'une technique efficace où la chaleur libérée lors de l'oxydation des minéraux sulfurés alimente le procédé de fusion. Ce procédé produit non seulement une matte (ou parfois du cuivre blister), mais aussi un laitier. La température de fonctionnement des fours est de 1 230 à 1 250 °C, température à laquelle le mercure élémentaire et les composés à base de sulfure de mercure se volatilisent complètement. Le gaz de procédé est recueilli et acheminé vers le système d'épuration des gaz.

#### **2.3.4 Convertissage**

Dans le cas des procédés produisant une matte, l'étape suivante est le convertissage de celle-ci, avec l'alliage de cuivre résultant de l'épuration de ce que l'on appelle le laitier de fusion éclair, pour obtenir du cuivre blister. Un sous-produit de ce procédé est le laitier de convertisseur qui est traité plus avant dans un four de réduction en vue de récupérer le cuivre ou retourné vers le four de fusion. Le gaz de procédé généré par le convertissage est soumis à un piégeage des matières particulaires et enfin mélangé avec les gaz venant du four de fusion avant d'entrer dans le système d'épuration des gaz de l'unité de production d'acide sulfurique.

#### **2.3.5 Affinage et coulage**

Le cuivre blister est ensuite affiné dans des fours à anode, essentiellement pour en éliminer l'oxygène, le soufre et les polluants à l'état de traces. Le gaz de procédé généré dans les fours à anode est traité dans un laveur de gaz, puis dans un électrofiltre humide ou dans un filtre à manches. Le cuivre affiné est coulé pour former des anodes. Le dernier stade de la production de cuivre est l'électroraffinage des anodes pour obtenir des cathodes en cuivre contenant plus de 99,995 % de cuivre.

#### **2.3.6 Lavage du laitier**

Le laitier fondu produit dans le four à fusion et les convertisseurs peut être traité dans un four électrique de réduction afin d'en extraire le cuivre et les autres métaux précieux. Il en résulte une matte de grande qualité qui est alors acheminée vers les convertisseurs. On peut granuler le laitier final avec de l'eau avant de le mettre au rebut ou de l'utiliser comme agrégat.

Dans les procédés de fusion produisant directement du cuivre blister, la réduction du laitier peut produire des alliages de cuivre qui sont acheminés vers la fonderie en vue d'un nouveau traitement dans les convertisseurs.

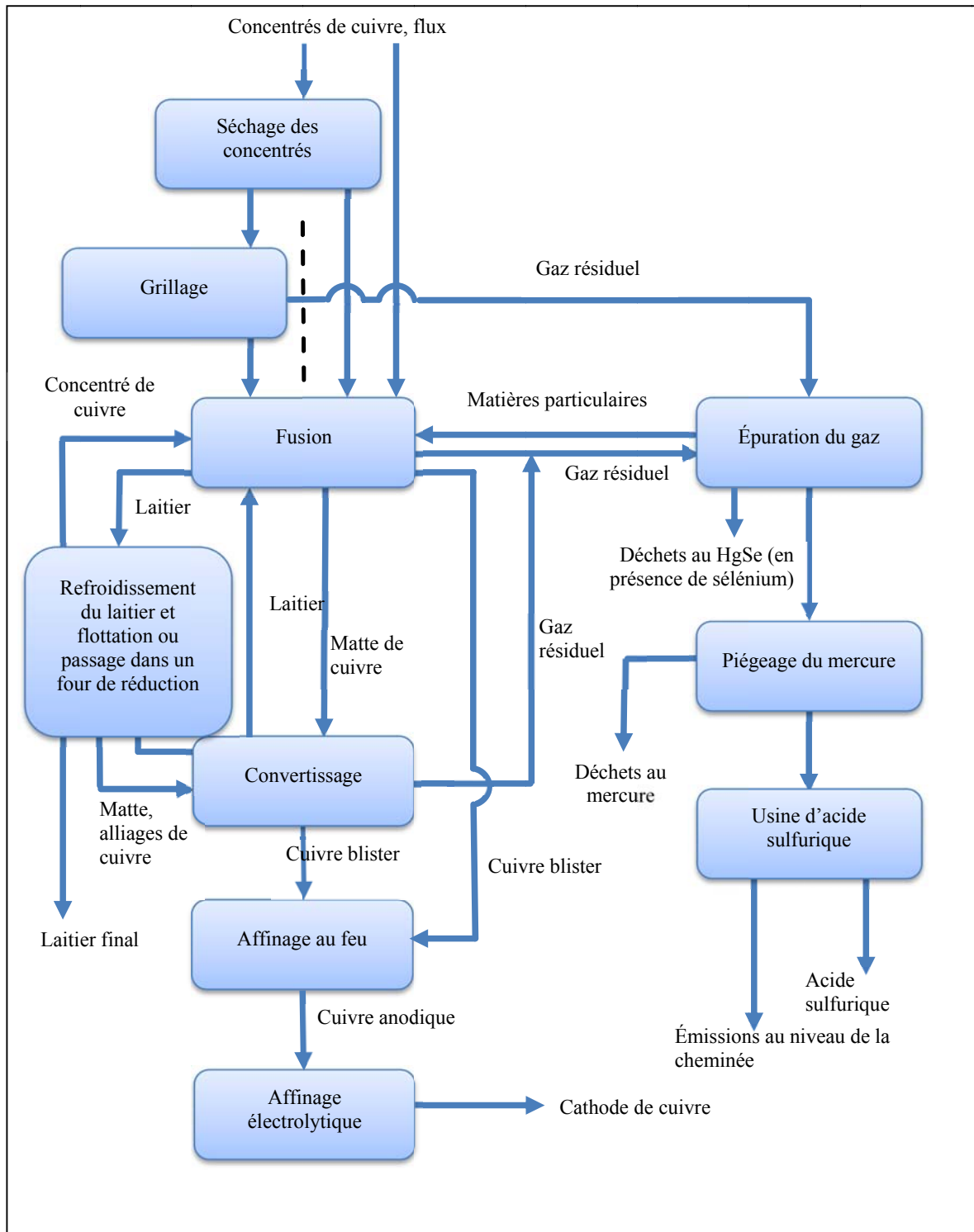
La réduction du laitier peut aussi se faire à l'aide de techniques de traitement de minéraux. Après un refroidissement lent, le laitier est concassé, broyé et traité par flottation. Il en sort un concentré contenant du cuivre qui est renvoyé à la fusion.

#### **2.3.7 Unité de production d'acide sulfurique**

Les gaz résultant des procédés de fusion et de convertissage sont acheminés vers la section d'épuration des gaz de l'unité de production d'acide sulfurique. Il est refroidi dans un premier temps et traité en vue d'en éliminer les matières particulaires, les métaux et le brouillard acide à l'aide de dispositifs d'épuration, tels que des laveurs et des électrofiltres humides. Pendant l'épuration du gaz, ce dernier est refroidi à 35-40 °C. La plus grande partie du mercure présent à la sortie de la fonderie est éliminée à ce stade grâce aux trois mécanismes suivants :

- Réaction d'une partie du mercure pour former du sulfate de mercure solide, qui est éliminé sous forme de boue;
- Condensation du mercure élémentaire par hypertrempe et refroidissement dans des laveurs et des tours de refroidissement à garnissage;
- Libération du sélénium contenu dans les concentrés de cuivre lors des procédés de fusion et de convertissage. Il est présent dans le gaz de procédé de la fonderie sous forme d'oxyde de sélénium. L'oxyde de sélénium se dissout dans la solution de lavage faiblement acide et est immédiatement réduit par le dioxyde de soufre pour former du rouge de sélénium qui réagit avec le mercure élémentaire pour former du séléniure de mercure solide (HgSe). Le séléniure de mercure est un composé extrêmement peu soluble dans l'eau et stable dans des conditions acides.

Après l'épuration du gaz, il peut être nécessaire d'appliquer une technique de piégeage de mercure avant la production d'acide afin d'éliminer tout mercure restant dans le gaz de procédé et de répondre aux normes commerciales. Au niveau de la dernière cheminée, les émissions ne devraient contenir que des concentrations infimes de mercure. La gestion des résidus et boues contenant du mercure issus des procédés d'épuration des gaz ou de piégeage du mercure, notamment le stockage, la mise au rebut et le commerce, devrait être en adéquation avec d'autres articles pertinents de la Convention.



**Figure 3 : Procédés de production primaire de cuivre**

## 2.4 Étapes du procédé de production d'or

Certains minerais d'or nécessitent un prétraitement avant la lixiviation, alors que d'autres peuvent être directement lixiviés. Cette section se concentre sur les minerais qui nécessitent un prétraitement de grillage avant la lixiviation, étant donné que l'annexe D de la Convention de Minamata couvre le grillage. La Figure 4 présente un aperçu des procédés impliqués.

### 2.4.1 Grillage

Du minerai d'or concassé contenant généralement de 0 à 100 ppm de mercure est introduit dans le four de grillage. Ces fours fonctionnent à une température comprise entre 500 et 600 °C, la chaleur servant à oxyder le soufre et le carbone contenus dans le minerai, de sorte que l'or puisse être lixivié et récupéré. Les températures élevées entraînent la volatilisation du mercure contenu dans le minerai. Les gaz produits par le procédé de grillage sont traités en plusieurs étapes, certaines d'entre elles permettant de contrôler les polluants associés, mais aussi par des procédés spécifiques aux unités, qui sont utilisés pour réduire autant que possible les émissions de mercure. Ces contrôles sont décrits de manière plus détaillée dans l'étude de cas présentée séparément. Selon les résultats obtenus dans les installations commerciales existantes dotées de contrôles similaires, l'élimination globale du mercure du gaz résiduel du four de grillage serait supérieure à 99 %.

#### **2.4.2 Lixiviation**

Le produit de grillage est mélangé à de l'eau dans un bac à agitation pour former une suspension épaisse, qui est acheminée vers une série de cuves où l'or est extrait par lixiviation (circuit de lixiviation au carbone) à l'aide de cyanure. Après dissolution, les complexes à base d'or et de mercure présents dans la suspension sont adsorbés sur du charbon actif. Une fois débarrassée de l'or et du mercure qu'elle renferme, la suspension est soumise à un procédé de neutralisation et de détoxification, puis rejetée dans les bassins de retenue des résidus miniers en tant que déchets. Le mercure soluble dans le cyanure qui reste dans les résidus de la lixiviation contribuera très peu au mercure atmosphérique en raison de la très faible pression de vapeur du complexe mercure-cyanure.

#### **2.4.3 Extraction et régénération**

Le charbon aurifère provenant du circuit de lixiviation est lavé, puis transféré dans une cuve où l'or et le mercure sont remis en solution. On obtient un liquide à forte teneur en or dont il est possible d'extraire ce dernier par électrolyse ou précipitation, comme décrit ci-dessous. Après extraction de l'or qu'il contient, le charbon passe dans un four en vue de sa régénération thermique, avant d'être renvoyé à l'étape de lixiviation.

Le charbon appauvri contient encore un peu de mercure adsorbé. Celui-ci est éliminé dans le four de régénération, une cuve fermée dans laquelle le charbon est chauffé à une température supérieure à 700 °C pour le sécher, évaporant par la même occasion le mercure restant. La cuve ne contient pas d'oxygène afin que le charbon puisse sécher sans s'oxyder ni brûler. Le gaz est évacué et refroidi, ce qui permet de recueillir le mercure élémentaire, après condensation, dans des flacons industriels intégraux. Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris leur stockage, leur mise au rebut et leur commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

Tout mercure gazeux restant est ensuite éliminé par passage dans une cuve contenant du charbon actif imprégné de soufre. Le mercure présent dans le gaz se lie chimiquement avec le soufre pour former un composé stable de cinabre (sulfure mercurique).

D'après les résultats obtenus dans d'autres installations commerciales existantes dotées de contrôles similaires, le taux global d'élimination du mercure contenu dans les effluents gazeux des fours de régénération du charbon serait supérieur à 99 %. Bien qu'ils ne soient pas visés par l'annexe D de la Convention de Minamata, il est important de noter qu'en l'absence de mesures de contrôle, ces fours sont susceptibles de constituer des sources non négligeables d'émissions de mercure.

#### **2.4.4 Affinage**

La boue aurifère résultant de l'extraction électrolytique ou de la précipitation à l'aide de poussières de zinc est filtrée, puis traitée dans une cornue, où elle est chauffée à une température supérieure à 600 °C, ce qui en élimine le mercure par évaporation. Le gaz de cornue est acheminé vers un équipement de traitement en vue d'en retirer le mercure avant d'acheminer le matériau aurifère vers un four d'affinage. Le gaz est d'abord refroidi, puis condensé pour pouvoir recueillir le mercure sous une forme élémentaire. Tout mercure restant est ensuite éliminé par passage dans une cuve contenant du charbon actif imprégné de soufre. Le mercure présent dans le gaz se lie chimiquement au soufre pour former un composé stable de cinabre. D'après les résultats obtenus dans d'autres installations existantes dotées de contrôles similaires, le taux global d'élimination du mercure contenu dans les effluents gazeux de la cornue serait supérieur à 99 %.

#### **2.4.5 Four**

Les solides aurifères séchés provenant de la cornue sont chauffés dans un four à des températures supérieures au point de fusion de tous les constituants de la charge afin de séparer finalement l'or des impuretés. Les gaz d'évacuation passent d'abord dans un filtre à manches destiné à éliminer les matières particulaires et notamment le mercure fixé sur des particules. On leur fait ensuite traverser une cuve contenant du charbon actif imprégné de soufre où le mercure forme une liaison chimique avec le soufre pour former un composé de cinabre stable. D'après les résultats obtenus dans d'autres installations existantes dotées de contrôles similaires, le taux global d'élimination du mercure contenu dans les effluents gazeux du four serait supérieur à 99 %. Les déchets contenant le mercure devraient être mis au rebut d'une manière écologiquement rationnelle. À des fins de clarification, il convient de noter que les émissions du four ne sont pas couvertes par l'annexe D de la Convention de Minamata. De plus, il semblerait que les fours ne seraient que des sources mineures d'émissions de mercure.

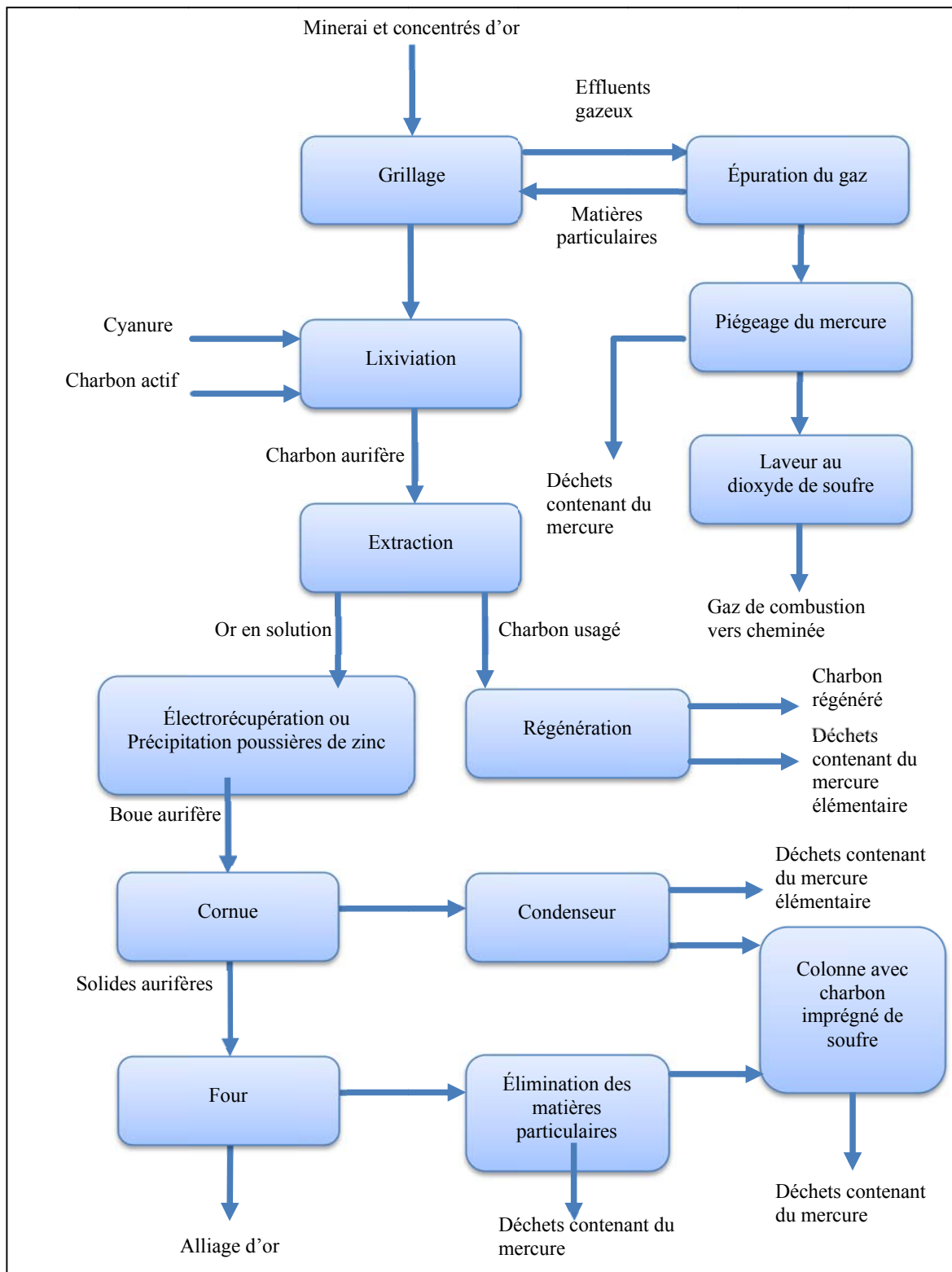


Figure 4: Procédés de production primaire d'or

### 3 Techniques de contrôle des émissions

La section suivante décrit les principales techniques d'élimination des émissions atmosphériques de mercure pertinentes à la fusion et à l'affinage dans le secteur des métaux non ferreux. En général, ces techniques reposent sur une certaine forme d'oxydation du mercure et les interactions avec des matériaux comme le chlorure mercurique. Dans cette liste, ne figurent pas les techniques reconnues pour réduire les émissions atmosphériques de mercure grâce

au piégeage d'autres polluants, notamment des composés organiques ou d'autres matières particulières. Une section transversale sur les techniques de contrôle de multiples polluants présentant un avantage pour le piégeage des émissions de mercure est également présentée.

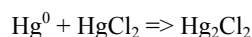
Le mercure est volatil aux températures observées dans la plupart des procédés d'élimination; il faut donc faire appel à des techniques sectorielles spécifiques pour l'éliminer. Dans le cas de l'élimination du mercure en amont d'une unité de production d'acide sulfurique, tout le mercure résiduel sera présent dans l'acide produit. L'acide est souvent classé comme étant de qualité commerciale, technique ou électrolytique, de batterie, de qualité alimentaire, etc. Ces termes ont un caractère général et peuvent être différents d'un fournisseur et d'un pays à l'autre. La spécification du produit dépend de l'utilisation potentielle de l'acide. La teneur en mercure de celui-ci est généralement inférieure à 1,0 ppm et équivalente à ~0,02 mg/Nm<sup>3</sup> dans le gaz lavé<sup>1</sup>, même si certaines applications exigent des concentrations sensiblement inférieures<sup>2</sup>.

### 3.1 Procédé de Boliden Norzink

#### 3.1.1 Description

Le procédé de Boliden Norzink (également dénommé procédé de lavage au chlorure d'Outotec ou procédé BN d'Outotec<sup>3</sup>) piège le mercure élémentaire des rejets gazeux des fonderies primaires de minerais en convertissant le mercure en chlorure mercureux, Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (également connu sous le nom de « calomel »). Le calomel est le résultat de la réaction du mercure avec le chlorure mercurique, HgCl<sub>2</sub>. Le chlorure mercurique est alors récupéré d'une partie du calomel par oxydation avec du chlore, puis réintégré dans le procédé d'épuration du gaz.

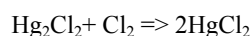
Le procédé<sup>4</sup> se déroule dans une tour à lit à garnissage. La vapeur de mercure élémentaire contenue dans le rejet gazeux est oxydée par une solution de lavage aqueuse de chlorure mercurique :



La tour comprend une cuve cylindrique verticale renforcée par fibre de verre traversée de bas en haut par le rejet gazeux. Elle est remplie d'un garnissage en polypropylène (en général, en forme de selles). Dans la partie supérieure de la tour, la solution de lavage est pulvérisée par-dessus le garnissage par une série de buses. Un dévésiculateur à chevrons ou à grillage métallique disposé à la sortie de la tour empêche la solution de sortir du système. La température du procédé est d'environ 40 °C ou moins et la perte de charge dans la tour est d'environ 1 kPa.

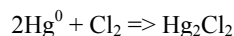
Le calomel résultant est insoluble. Il précipite dans la liqueur et est éliminé au fond de la tour sous la forme d'une suspension épaisse. La liqueur est ensuite réacheminée vers le laveur de gaz. Dans des conditions de procédé optimales, la quasi-totalité du mercure élémentaire réagit avec le chlorure mercurique.

Pour obtenir une oxydation efficace, il est nécessaire de maintenir une concentration élevée de chlorure mercurique dans la solution de lavage circulante. Une moitié de la suspension est donc traitée au chlore gazeux pour oxyder de nouveau le chlorure mercureux précipité en chlorure mercurique.



Dès que la solution de calomel traitée est entièrement régénérée, elle est pompée dans un réservoir de stockage. Lorsque la concentration en chlorure mercurique s'appauvrit dans le circuit de lavage, on ajoute la solution de chlorure mercurique régénérée à partir du réservoir de stockage afin de maintenir la concentration de chlorure mercurique dans le circuit de lavage.

La réaction nette des étapes de procédé (a) et (b) est la suivante :



L'autre moitié de la suspension de calomel est acheminée vers un décanteur. La solution clarifiée déborde et est réacheminée vers le réservoir de la pompe de la tour de lavage. Le chlorure mercureux insoluble se dépose au fond du décanteur dans un réservoir conique. Les solides passent dans un décanteur secondaire en vue d'une concentration plus poussée. On peut ajouter de la poudre de zinc pour faciliter la précipitation. Les solides provenant du décanteur secondaire sont introduits dans des fûts de stockage en vue de leur vente ou d'un autre traitement en interne. Le calomel obtenu peut être mis au rebut ou utilisé pour la production de mercure élémentaire. Le mercure est ensuite entreposé dans des réservoirs de stockage sécurisés. La Figure 5 présente un diagramme du procédé de Boliden Norzink.

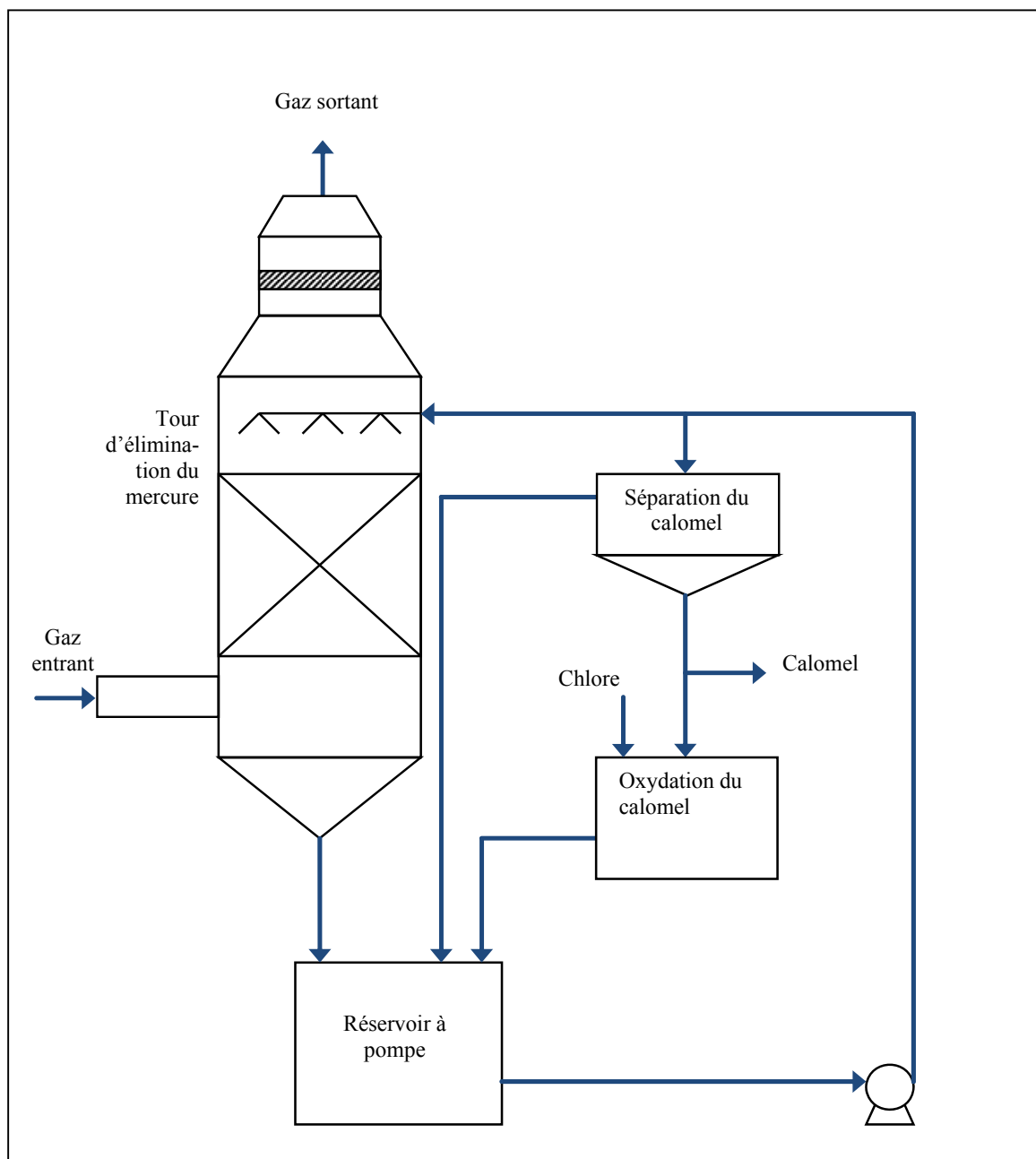
<sup>1</sup> [www.mercuryconvention.org/Portals/11/.../EG1/EU\\_information.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/.../EG1/EU_information.pdf); consulté le 24 mars 2015.

<sup>2</sup> [http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties\\_acid\\_quality.htm](http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm); consulté le 24 mars 2015.

<sup>3</sup> <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/#tabid-2> consulté le 24 mars 2015.

<sup>4</sup> [http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl\\_hg.htm](http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hg.htm); consulté le 24 mars 2015.

Il convient de tenir compte des risques sanitaires qu'une exposition au chlorure mercurique ou au chlore (fortement toxique) peut présenter pour les travailleurs.



**Figure 5: Diagramme du procédé de Boliden Norzink avec récupération de  $Hg_2Cl_2$  (Hultbom 2003)**

### 3.1.2 Applicabilité

Cette technique peut s'appliquer à tous les gaz de procédé produits par les fonderies de minerais, et en particulier à ceux contenant du  $SO_2$ . Elle est efficace pour des teneurs initiales en mercure variables ou même élevées et est utilisée dans environ 40 installations dans le monde entier.

### 3.1.3 Performance

Le rendement d'élimination dépend de la teneur en mercure du rejet gazeux initial; il est généralement de 99,7 %. La teneur en mercure type à la sortie varie de 0,3 à 0,5  $ppm^5$  (Hultbom 2003; CEE-ONU 2013). Une teneur à la sortie de

<sup>5</sup> <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/>; consulté le 24 mars 2015.



0,3 à 0,5 ppm peut également être obtenue avec des teneurs initiales en mercure supérieures à 100 mg/Nm (Hultbom 2003).<sup>6</sup>

**Tableau 1**

Performance du procédé de Boliden Norzink à Boliden Rönnskar<sup>7</sup> (BREF NFM 2014)

Débit du gaz 30 000 Nm <sup>3</sup> /h	En amont [µg/Nm <sup>3</sup> ]	En aval [µg/Nm <sup>3</sup> ]	Efficacité de réduction [%]
Teneur élevée à l'entrée	9 879	30	99,7
Faible teneur à l'entrée	51	13	74

### 3.1.4 Effets croisés entre différents milieux

Les effets croisés entre différents milieux du procédé sont notamment les suivants :

- Effets sur l'air et l'eau du fait de la production de déchets de calomel solides, par lixiviation ou vaporisation du mercure.

### 3.1.5 Coûts d'installation et d'exploitation

Du fait de la faible température du procédé (inférieure à 40 °C), on utilise principalement des matériaux plastiques pour la construction.

Les coûts d'exploitation sont faibles, du fait qu'ils se limitent aux éléments suivants :

- Consommation électrique des pompes de circulation;
- Consommation électrique accrue des ventilateurs pour compenser la perte de charge créée par la tour de lavage;
- Consommation de chlore gazeux pour la récupération du chlorure mercurique.

Les coûts d'exploitation sont quasiment indépendants de la teneur en mercure du rejet gazeux<sup>7</sup> (Hultbom 2003) et le procédé est considéré comme étant économiquement viable. À Aurubis, à Hambourg, les coûts d'équipement pour l'installation d'élimination de mercure se sont élevés à 5 millions d'euros (incluant le condenseur, les chauffages, le filtre à manches, le système d'injection, l'absorbeur et les ventilateurs) (BREF NFM 2014).

## 3.2 Filtre à sélénium

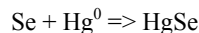
### 3.2.1 Description

Le procédé du filtre à sélénium<sup>3,4</sup> permet de nettoyer les rejets gazeux à faible teneur en mercure élémentaire des fonderies primaires de minerais en transformant l'acide sélénieux en sélénium amorphe rouge, qui réagit avec le mercure gazeux pour former du séléniure mercurique.

Le filtre à sélénium est un filtre à lit fixe doté d'une grande surface active, conçu pour établir un contact étroit avec la substance active. On y utilise un matériau inerte poreux semblable à celui d'un support catalytique. Le matériau est imprégné de sélénium amorphe rouge. L'imprégnation est obtenue en séchant une solution d'acide sélénieux en présence de SO<sub>2</sub> afin de faire précipiter du sélénium amorphe rouge :



Le sélénium amorphe rouge réagit avec le mercure dans le gaz pour former du séléniure mercurique :



La durée de contact dans le filtre est de l'ordre de 1 à 3 secondes.

Le filtre reste efficace jusqu'à ce que sa teneur en mercure atteigne 10 à 15 %. Il est alors traité en vue de récupérer le mercure et de régénérer le sélénium.

La pression de vapeur du mercure à des températures comprises entre 0 et 100 °C est très faible par rapport à celle du HgSe. Le sélénium est une substance de contrôle adaptée étant donné que sa pression de vapeur est également très faible à ces températures et les pertes de sélénium sont mineures. Les filtres peuvent fonctionner à des températures atteignant 110 °C avec des gaz saturés en vapeur d'eau. Il convient toutefois d'éviter toute condensation à l'intérieur des filtres.

<sup>6</sup> L'unité Nm<sup>3</sup> est le mètre cube normalisé et se rapporte au gaz mesuré à une pression de 1 atmosphère et à une température de 0 °C.

<sup>7</sup> Commission économique pour l'Europe de l'ONU, Protocole sur les métaux lourds, disponible à : [http://www.unece.org/env/lrtap/hm\\_h1.html](http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.html); consulté le 24 mars 2015.

La perte de charge est de l'ordre de 600 Pa dans le cas d'un filtre à un étage avec un temps de rétention de trois secondes.

Le filtre à sélénium permet de débarrasser les rejets gazeux des fonderies de la quasi-totalité du mercure qu'ils contiennent. Il peut aussi être appliqué dans une deuxième étape de traitement des rejets gazeux pour réduire la teneur en mercure en amont d'une unité de production d'acide produisant des acides sans mercure.

Par rapport à d'autres adsorbants en lit fixe comme le charbon actif, le filtre à sélénium présente l'avantage de réagir de manière sélective avec le mercure. Aucune réaction secondaire indésirable ne se produit, étant donné que la masse de sélénium n'a aucune activité catalytique connue. Cela permet, par exemple, d'utiliser un filtre à sélénium pour éliminer le mercure dans des gaz humides contenant du SO<sub>2</sub>. En présence de charbon actif, le SO<sub>2</sub> est oxydé en SO<sub>3</sub> qui se combine à la vapeur d'eau pour former de l'acide sulfurique pouvant colmater le filtre (Hultbom 2003).

Par ailleurs, afin d'obtenir des concentrations de mercure inférieures ou égales à 0,05 mg/Nm<sup>3</sup>, il est nécessaire de sensiblement refroidir le gaz à des températures inférieures à 0 °C pour séparer les composés de mercure particuliers du mercure liquide. Le même niveau de résidus peut être obtenu en recueillant le mercure sous forme de sélénure mercurique (HgSe) à des températures pouvant atteindre environ 140 °C (Hultbom 2003).

### 3.2.2 Applicabilité

L'applicabilité est démontrée dans au moins six installations du monde entier.

### 3.2.3 Performance

Le rendement d'élimination dépend du temps de rétention. Pour atteindre un rendement d'élimination de 95 %, un temps de rétention de trois secondes est généralement nécessaire (Hultbom 2003). On obtient généralement des chiffres de l'ordre de 90 %<sup>4</sup>. La concentration moyenne minimum attendue par heure à la sortie<sup>7</sup> est inférieure à 0,01 mg/Nm<sup>3</sup> (CEE-ONU Protocole sur les métaux lourds 2013). Les tableaux suivants indiquent les taux de réduction typiques.

**Tableau 2**

Performance du procédé du filtre à sélénium à Boliden Rönnskar<sup>7</sup> (fonderie de cuivre-plomb-zinc) (BREF NFM 2014)

Débit du gaz 80 000 Nm <sup>3</sup> /h	En amont [µg/Nm <sup>3</sup> ]	En aval [µg/Nm <sup>3</sup> ]	Taux de réduction [%]
Teneur élevée à l'entrée	1 008	48	95
Faible teneur à l'entrée	42	12	71

**Tableau 3**

Résultats types du procédé du filtre à sélénium (Hultbom 2003)

Débit du gaz	En amont [µg/Nm <sup>3</sup> ]	En aval [µg/Nm <sup>3</sup> ]	Taux de réduction [%]
Teneur élevée à l'entrée	6 000	<50	99

### 3.2.4 Coûts d'installation et d'exploitation

Le coût d'équipement est proportionnel au débit de gaz.

Lorsque la masse de sélénium est saturée de mercure, elle doit être remplacée. Cette opération représente le principal coût de cette technique et son coût est sensiblement proportionnel à la quantité de mercure éliminée (Hultbom 2003).

Les coûts d'installation d'un filtre à sélénium sont souvent comparés à ceux du procédé de Boliden Norzink lorsque ces techniques sont les mieux indiquées. À des débits de gaz inférieurs, le coût d'équipement relatif est inférieur à celui du procédé de Boliden Norzink, étant donné qu'il s'agit de la méthode de lavage qui exige le plus d'équipement. L'inverse est vrai pour les débits supérieurs, étant donné que les coûts d'augmentation d'échelle pour un laveur de gaz sont inférieurs à ceux d'un filtre à lit fixe (Hultbom 2003).

Pour les débits de gaz plus élevés avec des teneurs en mercure importantes à l'entrée, le procédé de Boliden Norzink est le plus économique. On a cependant signalé qu'il est possible de combiner le procédé de Boliden Norzink au filtre à sélénium pour satisfaire les exigences les plus strictes d'élimination du mercure (Hultbom 2003).

Les coûts indicatifs donnés par les sources de l'industrie pour un filtre à sélénium d'une capacité de 200 000 m<sup>3</sup>/h font état d'un investissement initial d'environ 3 millions d'euros, plus 70 tonnes de sélénium à un prix de 35 000 euros la tonne.

### 3.2.5 Effets croisés entre différents milieux

Il existe des effets potentiels sur l'air et l'eau en raison de la vaporisation de mercure élémentaire ou oxydé lors de la production des déchets solides de sélénure mercurique. Les déchets doivent être stabilisés avant d'être traités plus

avant. Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

### **3.3 Charbon actif**

#### **3.3.1 Description**

Le charbon actif imprégné de soufre<sup>8</sup> est une technique éprouvée utilisée dans le secteur de l'or industriel pour contrôler les émissions atmosphériques de mercure. Le charbon actif peut être appliqué dans une structure de type lit fixe ou injecté. Le mercure présent dans les émissions gazeuses réagit avec le charbon actif imprégné de soufre quand il traverse le lit pour former du sulfure mercurique. L'avantage du charbon actif est qu'il permet d'éliminer tous les types de mercure présents dans les émissions atmosphériques, y compris le mercure élémentaire, le mercure oxydé et le mercure fixé sur des particules.

Cette technique de contrôle piège le mercure sous forme de sulfure de mercure stable (HgS) dans le charbon actif imprégné de soufre. Elle en est à un stade avancé de développement et est une technique éprouvée couramment utilisée dans le secteur des métaux non ferreux, en particulier dans l'industrie d'extraction de l'or. Elle est aussi couramment utilisée dans le secteur de la production d'électricité.

Lorsqu'une source utilise du charbon actif, elle doit en surmonter certaines limites. En premier lieu, les températures de fonctionnement maximales varient d'un fabricant à l'autre. Il peut s'avérer nécessaire de prérefroidir le flux gazeux. En deuxième lieu, si la teneur en eau du flux gazeux est supérieure à 10 %, il est nécessaire d'appliquer un prétraitement pour la réduire. Enfin, il existe un risque d'incendie lié à l'utilisation du charbon actif; de nombreuses installations s'en servent cependant depuis de nombreuses années sans avoir eu à déplorer le moindre incident. S'ils sont bien gérés, ces risques peuvent être réduits.

#### **3.3.2 Applicabilité**

Le charbon actif peut être utilisé pour éliminer toutes les formes d'émission de mercure : à l'état gazeux, de particules, élémentaire et oxydé. Il peut adsorber de 10 à 40 % en poids de mercure avant qu'il ne soit nécessaire de le remplacer. De plus, le charbon imprégné au soufre (15 à 20 % en poids) est efficace pour former un sorbant stable.

#### **3.3.3 Performance**

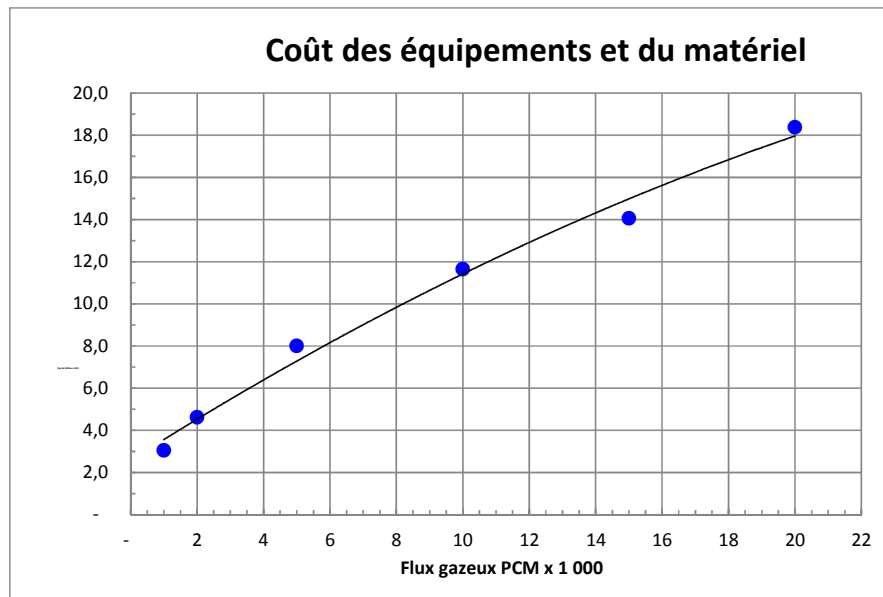
Bien conçus et entretenus, les systèmes d'adsorption au charbon actif imprégné de soufre situés en aval d'un condenseur sont capables de piéger 99 % du mercure et d'abaisser sa concentration à 0,01 mg/m<sup>3</sup>. D'après les spécifications des fabricants, leur capacité d'adsorption du mercure varie de 10 à 40 %. Toutefois, on remplace généralement le charbon lorsque sa charge de mercure atteint 20 % en poids. L'adsorbant usagé est mis au rebut comme un déchet dangereux ou traité en vue de récupérer le mercure élémentaire. Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

#### **3.3.4 Coûts d'installation et d'exploitation**

L'un des facteurs importants à prendre en compte dans les coûts d'équipement est le débit volumétrique du gaz à traiter. La Figure 6 récapitule le coût des équipements et matériaux nécessaires pour un système faisant intervenir des procédés de lavage, de refroidissement, de condensation et d'adsorption sur un des lits de charbon. Les coûts de construction et d'installation ne sont pas inclus, étant donné leur variabilité en fonction de la géographie et de la complexité des projets connexes.

---

<sup>8</sup> Il existe d'autres types de charbon actif imprégné (halogène, fluor, iode et brome) également utilisés pour le contrôle du mercure, mais il reste à démontrer que le secteur non ferreux les utilise activement. Ils ont peut-être davantage leur place dans notre section sur les nouvelles techniques émergentes. C'est pour cette raison que ce chapitre se concentre sur le charbon imprégné de soufre.



**Figure 6: Coûts des équipements et des matériaux nécessaires pour les filtres au charbon actif imprégné de soufre en fonction du débit volumétrique (PCM : pieds cubes par minute, 1 PCM = 1,7 m<sup>3</sup>/h)**

Le principal coût d'exploitation se rapporte au remplacement et à la mise au rebut, ou au traitement du charbon actif usagé. La fréquence de remplacement est fonction de la teneur en mercure du flux gazeux. En Amérique du Nord, le coût de remplacement du charbon imprégné de soufre est de 6,6 USD/kg.

### 3.3.5 Avantages connexes

Le charbon actif non imprégné de soufre est très efficace pour éliminer des composés organiques comme les dioxines ou les furannes et les composés organiques volatils (COV) présents dans le flux gazeux. En présence de composés organiques, on installe un « lit de pré-nettoyage au charbon actif » afin d'éliminer ceux-ci en amont du lit imprégné au soufre prévu pour piéger le mercure. Sans le lit de pré-nettoyage, les composés organiques s'adsorbent sur le charbon actif imprégné de soufre, réduisant la capacité d'élimination ultérieure du mercure et augmentant les coûts du fait de l'augmentation de la fréquence de remplacement des lits (Krumins *et al.* 2013).

### 3.3.6 Effets croisés entre différents milieux

Il peut être nécessaire de mettre au rebut le charbon actif imprégné chargé de mercure comme un déchet dangereux. Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

## 3.4 Procédé utilisant un filtre DOWA (filtre en pierre ponce recouvert de sulfure de plomb [II])

Le procédé au sulfure de plomb (II) est une technique à sec utilisée pour éliminer le mercure des gaz de combustion générés par les fonderies de métaux non ferreux. On fait passer les gaz contenant du mercure volatil dans une tour remplie de granules, par exemple de pierre ponce, revêtues de sulfure de plomb pour améliorer le contact avec le gaz. Au contact du gaz avec le sulfure de plomb (II), le mercure, dont la pression de vapeur est élevée, se transforme en sulfure de mercure, dont la pression de vapeur est très faible. Ce procédé permet, selon les mesures, un taux d'élimination du mercure de 99 %, ce qui se traduit par des concentrations de mercure de 0,01 à 0,05 mg/Nm<sup>3</sup> dans les émissions.

Des coûts indicatifs ont été obtenus de sources au sein de l'industrie : le coût d'équipement initial pour une tour Dowa avec une capacité de traitement de 200 000 m<sup>3</sup>/h est d'environ 5,5 millions d'euros, plus le coût des matériaux filtrants de 1 800 euros/tonne. La durée de vie de la tour est d'environ 5 à 10 ans.

## 3.5 Procédé de Jerritt

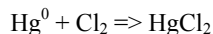
### 3.5.1 Description

Le procédé de Jerritt est actuellement utilisé dans une mine d'or et est illustré dans la figure 8. Il permet d'éliminer le mercure élémentaire des effluents gazeux des fours à griller en convertissant le mercure en chlorure mercurique, HgCl<sub>2</sub>. Le chlorure mercurique est le résultat de la réaction du mercure avec le chlore dissous, Cl<sub>2</sub>. Un flux de purge

contenant du chlorure mercurique est alors traité par extraction électrolytique directe en vue de récupérer le mercure élémentaire, traité à la poudre de zinc pour faire précipiter le chlorure mercurique ou réacheminé vers le décanteur pour récupérer l'or.

Le procédé de Jerritt a été mis au point et installé pour la première fois en 2009 par la société canadienne Yukon-Nevada Gold Corporation dans son installation de grillage de minerai tout venant de Jerritt Canyon (Elko, Nevada, États-Unis). Ultérieurement, en 2010, le système a été installé dans son séchoir à minerai.

Le procédé se déroule dans une tour à lit à garnissage. La vapeur de mercure élémentaire présente dans le rejet gazeux est oxydée par une solution de lavage aqueuse de chlore dissous :



La tour comprend une cuve cylindrique verticale renforcée de fibre de verre traversée de bas en haut par le flux gazeux. Elle est remplie d'un garnissage de polypropylène en forme de selle. Dans la partie supérieure de la tour, la solution de lavage est pulvérisée par une série de buses par-dessus le garnissage.

Un dévésiculateur à chevrons ou à grillage métallique disposé à la sortie de la tour empêche la solution de lavage de sortir du système. La température du procédé est inférieure ou égale à 40 °C. Dans la tour de lavage, la perte de charge est d'environ 1 kPa.

La liqueur est réacheminée vers le laveur de gaz et un flux de purge en volume égal à celui de la solution de contrôle du pH et le brouillard du dévésiculateur sont éliminés de la solution recirculante. Dans des conditions de procédé optimales, la quasi-totalité du mercure élémentaire réagit avec le chlore dissous.

Il convient de tenir compte des risques qu'une exposition au chlorure mercurique (fortement toxique) peut présenter pour la santé des travailleurs.

### **3.5.2 Applicabilité**

Ce procédé s'applique à tous les rejets gazeux des fours à griller et en particulier à ceux où le SO<sub>2</sub> a été éliminé par lavage. La technique est efficace pour des teneurs initiales en mercure élevées, comme celles produites par les fours à griller Jerritt, mais aussi pour de faibles teneurs d'entrée en mercure comme celles produites par le séchoir à minerai Jerritt.

### **3.5.3 Performance**

Le rendement d'élimination est généralement de 99,97 %. La teneur en mercure type à la sortie varie de 0,004 à 0,005 ppm.

### **3.5.4 Effets croisés entre différents milieux**

Les effets croisés entre différents milieux de ce procédé sont notamment les suivants :

- Effets sur l'air et sur l'eau en raison de la production de déchets solides de calomel (évitée si l'extraction électrolytique du mercure est appliquée au chlorure mercurique ou si le flux sortant du laveur de gaz est acheminé vers le décanteur du four à griller).

### **3.5.5 Coûts d'installation et d'exploitation**

Du fait de la faible température du procédé (inférieure à 40 °C), on utilise principalement des matériaux plastiques pour la construction.

Les coûts d'exploitation sont faibles, du fait qu'ils se limitent aux éléments suivants :

- Consommation électrique des pompes de circulation;
- Consommation électrique accrue des ventilateurs pour compenser la perte de charge créée par la tour de lavage;
- Consommation de chlore gazeux.

Les coûts d'exploitation dépendent très peu de la teneur en mercure de l'effluent gazeux.

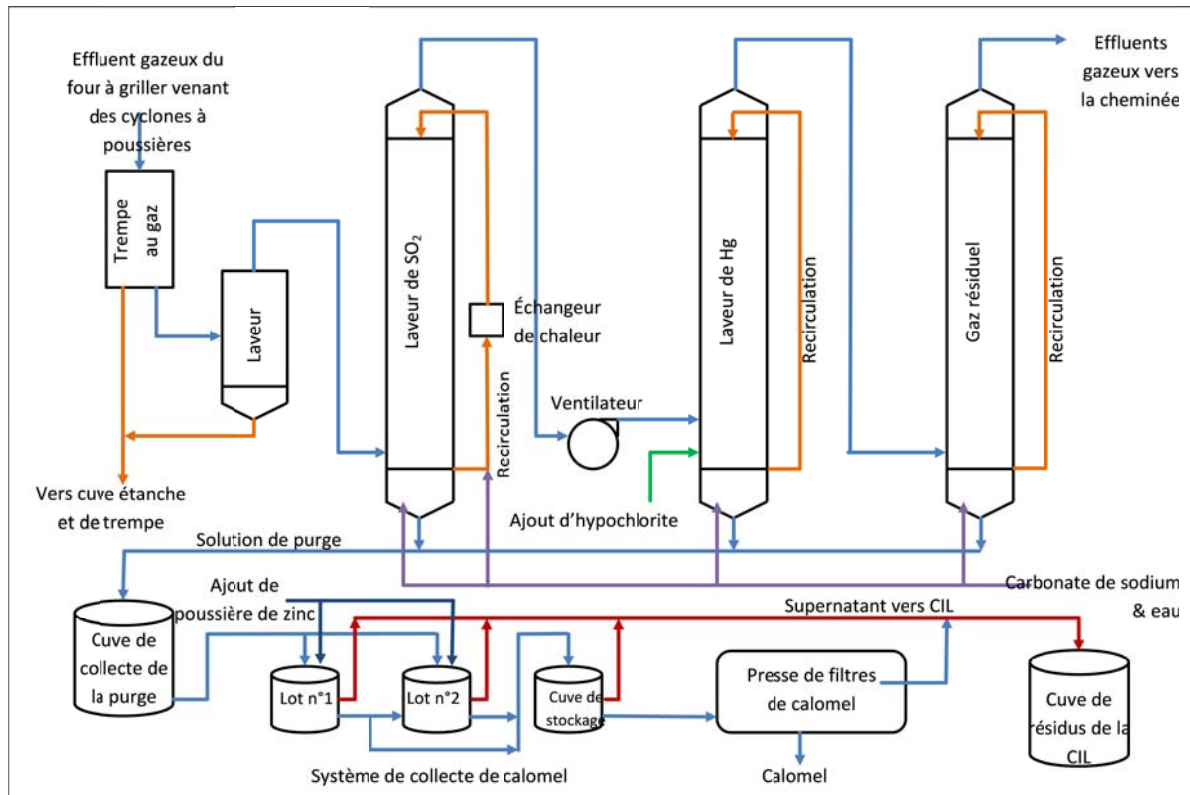


Figure 7 : Diagramme du procédé de Jerritt avec option de récupération de  $Hg_2Cl_2$

### 3.6 Avantages connexes des techniques d'élimination de la pollution atmosphérique et des unités de production d'acide pour le contrôle du mercure

#### 3.6.1 Techniques d'élimination de la pollution

Une section transversale sur les techniques courantes d'élimination de la pollution présentant un avantage connexe pour le piégeage des émissions de mercure est présentée dans le chapitre des techniques communes du document d'orientation des MTD/MPE. La présente section aborde l'applicabilité de ces techniques au secteur des métaux non ferreux.

##### 3.6.1.1 Filtres à manches

L'utilisation de filtres à manches est une pratique courante dans le secteur des métaux non ferreux, car il s'agit de la méthode de contrôle des particules qui permet d'obtenir le plus grand rendement d'élimination. Le gâteau de poussières formé dans les filtres peut être régulièrement éliminé avec des méthodes de type inversion du flux d'air, agitation mécanique, vibration et air pulsé. Il peut ensuite être recyclé dans le procédé de grillage en vue de récupérer les métaux précieux. Cette technique est efficace pour piéger le mercure sous forme de particules ou le mercure adsorbé sur les particules.

##### 3.6.1.2 Electrofiltres

Les électrofiltres tant humides que secs sont largement utilisés dans le secteur des métaux non ferreux en tant que première étape de l'élimination des particules. Dans les électrofiltres secs, les poussières recueillies sur les plaques sont éliminées par ébranlage ou vibration. Elles sont généralement recyclées dans le procédé de grillage.

Dans les électrofiltres humides, la poussière est évacuée par rinçage des plaques, généralement avec de l'eau. Il se produit ainsi un effluent et de la boue, qui peuvent être recyclés dans le procédé s'ils contiennent des matières précieuses, ou mis au rebut. Dans certains cas, il a été démontré que les électrofiltres humides sont efficaces pour éliminer tant la forme gazeuse que la forme particulaire lorsqu'ils sont utilisés avec d'autres techniques comme les laveurs et les refroidisseurs de gaz.

##### 3.6.1.3 Laveurs de gaz

Le secteur des métaux non ferreux utilise régulièrement des laveurs de gaz, par exemple pour refroidir les gaz et éliminer les particules et les impuretés du genre  $SO_3$ ,  $HCl$  et  $HF$  dans le cadre du procédé d'épuration des gaz en amont de la production d'acide sulfurique. Cette technique produit un effluent et de la boue. L'effluent peut être

réutilisé dans le laveur de gaz, tandis que la boue peut être recyclée dans le procédé de grillage, ou mise au rebut. Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

Les laveurs de gaz sont efficaces pour recueillir le mercure sous forme de particules ou le mercure adsorbé sur les particules. Ils ne sont cependant pas très efficaces pour éliminer le mercure en phase gazeuse des flux gazeux, sauf lorsqu'ils contiennent des composés de sélénium.

### **3.6.2 Combinaison d'unités d'épuration de gaz et d'unités de production d'acide**

#### **3.6.2.1 Description**

La combinaison de dispositifs d'épuration de gaz avec des unités de production d'acide est une technique éprouvée pour contrôler les émissions de soufre dans le secteur des métaux non ferreux et son utilisation est courante dans le monde entier. Dans certains cas, il a également été prouvé que l'exploitation d'une unité de production d'acide avec des dispositifs d'épuration de gaz était efficace pour capturer le mercure présent dans le flux gazeux par des techniques classiques de contrôle des particules dont l'efficacité d'élimination du mercure est équivalente à celle de MTD spécifiques pour le mercure. Dans ces cas, lorsque les propriétés du minerai et les conditions de procédé le permettent, la quasi-totalité du mercure est éliminée lors de l'épuration du gaz en amont de l'unité de production d'acide et le mercure résiduel est éliminé par un nouveau lavage du gaz après acheminement des matériaux vers l'unité de production d'acide.

Une enquête récente<sup>9</sup> réalisée au Japon a montré que de nombreuses entreprises font usage d'équipements d'épuration de gaz et d'unités de production d'acide sulfurique pour piéger le mercure présent dans les gaz de combustion de fonderies de métaux. L'étude montre que le mercure est efficacement piégé grâce à cette méthode dans certaines fonderies de cuivre, de plomb et de zinc.

#### **3.6.2.2 Applicabilité**

Les unités de production d'acide sulfurique combinées à des dispositifs d'épuration du gaz qui éliminent efficacement le mercure sont utilisées dans les fonderies de cuivre, de plomb et de zinc dans le monde entier.

Une étude japonaise détaillée a fourni un exemple de ce type d'installation (Takaoka *et al.* 2012) dans une fonderie de zinc utilisant le procédé Imperial Smelting avec un bilan massique global du mercure tel qu'illustré à la Légende : EF : électrofiltre, EV : laveur de type Venturi, RG : refroidisseur de gaz, EFH : électrofiltre humide, TD : tour de déshydratation, TCA : tour de conversion et d'absorption, LG : laveur de gaz

Figure 8.

#### **3.6.2.3 Degrés de performance**

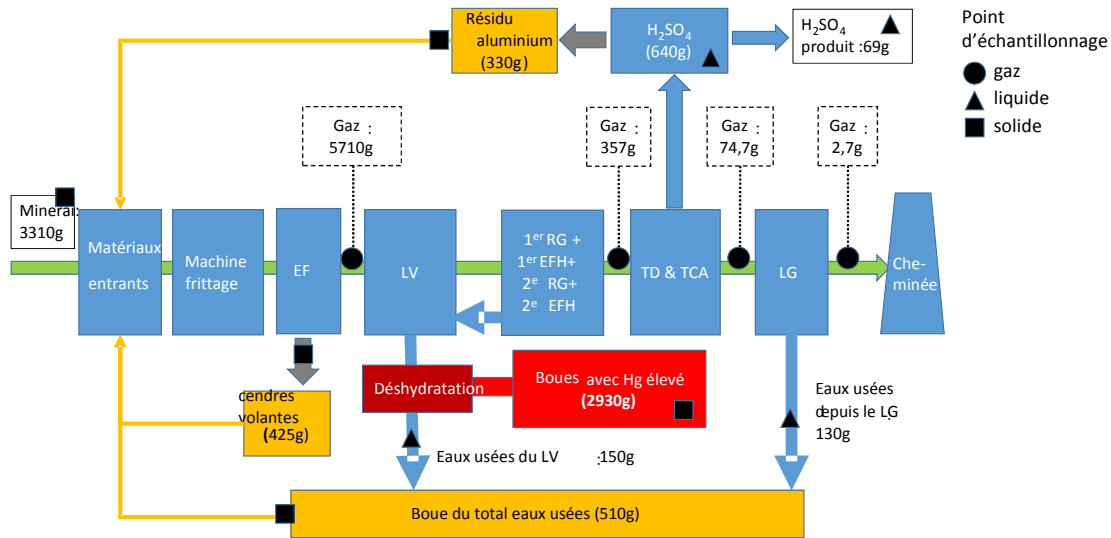
Les résultats de l'étude japonaise montrent l'efficacité potentielle de l'approche combinant des unités de production d'acide sulfurique à des équipements de lavage pour le piégeage du mercure. La concentration totale de mercure dans les gaz de combustion était comprise entre 1,7 et 6,1  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  (Takaoka *et al.* 2012).

#### **3.6.2.4 Coûts**

La combinaison de dispositifs d'épuration de gaz avec des unités de production d'acide sulfurique est la technique standard pour la capture de dioxyde de soufre dans les gaz de combustion des fonderies qui traitent les concentrés sulfurés. Lorsque le mercure peut être récupéré grâce à cette technique combinée avec une efficacité équivalente à celle de MTD spécifiques pour le mercure, il ne serait pas nécessaire d'investir de capitaux supplémentaires pour éliminer le mercure.

---

<sup>9</sup> [JMIA bulletin « Kozan (<http://www.mmf.or.jp/>) » édition d'avril 2015] Takashi Shimizu: Mercury Removal from the Nonferrous Smelter's Off-gas in Japan.



*Légende* : EF : électrofiltre, EV : laveur de type Venturi, RG : refroidisseur de gaz, EFH : électrofiltre humide, TD : tour de déshydratation, TCA : tour de conversion et d'absorption, LG : laveur de gaz

**Figure 8 : Bilan massique du mercure dans la production d'acide sulfurique dans une installation de zinc utilisant le procédé Imperial Smelting au Japon (Takaoka *et al.* 2012)**

### 3.6.2.5 Avantages connexes

Les unités de production d'acide sulfurique combinées à des dispositifs d'épuration du gaz sont très efficaces pour la capture de dioxyde de soufre. En réalité, le principal but de l'installation d'une unité de production d'acide sulfurique est le piégeage de dioxyde de soufre et la production d'acide sulfurique commercialisable.

### 3.6.2.6 Effets croisés entre différents milieux

Il existe des effets possibles sur l'air et sur l'eau du fait de la production de déchets solides contenant du mercure (boues). Le traitement des matériaux contenant du mercure y compris le stockage, la mise au rebut et le commerce doit être conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

## 4 Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales

### 4.1 Présentation des MTD

Le Tableau 6 présente des techniques qui pourraient être envisagées pour identifier les MTD pour la réduction du mercure dans le secteur des métaux non ferreux. Comme décrit dans la section 0, le fait d'allier des techniques d'élimination de la pollution particulaire et gazeuse avec des unités de production d'acide peut aussi permettre d'obtenir de faibles émissions acceptables.



**Tableau 6**

Récapitulatif des techniques de contrôle spécifiques du mercure pour les procédés de fusion et de grillage des métaux non ferreux (la performance type en termes d'émissions est indiquée, mais peut ne pas refléter toutes les situations possibles)<sup>47</sup> (CEE-ONU 2013)

Technique de contrôle du mercure	Description	Performance type (rendement d'élimination du mercure) <sup>a</sup>	Avantages/commentaires	Inconvénients
<b>Boliden-Norzink</b>	Technique fondée sur un laveur de gaz, utilisant la réaction entre le chlorure mercurique et le mercure provenant du chlorure mercurieux (calomel) qui précipite dans la solution.	99,7 % – concentration à l'entrée ~ 9 900 µg/m <sup>3</sup> 74 % – concentration à l'entrée ~ 51 µg/m <sup>3</sup>	Largement démontrée	Manipulation de chlore gazeux Manipulation de calomel Mise au rebut du calomel en tant que déchet dangereux
<b>Filtres à sélénium</b>	Le filtre à sélénium comprend un matériau inerte poreux imbibé d'acide sélénieux qui est ensuite séché pour précipiter du sélénium amorphe rouge. Le sélénium amorphe rouge réagit avec le mercure dans le gaz pour former du HgSe.	95 % – concentration à l'entrée ~ 1 000 µg/m <sup>3</sup> 71 % – concentration à l'entrée ~ 42 µg/m <sup>3</sup>	Particulièrement adapté lorsque la teneur en mercure du gaz est faible  Installation réussie dans les usines métallurgiques	Limitation de la concentration de mercure à l'entrée  Le filtre usagé doit être mis au rebut d'une manière écologiquement rationnelle
<b>Lits filtrants au charbon actif</b>	Les propriétés d'adsorption du charbon actif sont bien connues. Dans le cas du mercure, le charbon actif peut normalement adsorber 10 à 12 % de son propre poids.	97 % – concentration à l'entrée ~ 1 200 µg/m <sup>3</sup> 93 % – concentration à l'entrée ~ 37 µg/m <sup>3</sup>	Le charbon actif imprégné de soufre est disponible dans le commerce  Élimine le Hg <sup>0</sup> et d'autres formes  Faible capacité de lixiviation du mercure du charbon usagé	Le charbon usagé doit être mis au rebut en décharge
<b>DOWA</b>	Technique fondée sur l'adsorption du mercure sur des pierres ponce revêtues de sulfure de plomb	97 % – concentration à l'entrée ~ 50 µg/m <sup>3</sup> 88 % – concentration à l'entrée ~ 11 µg/m <sup>3</sup>		Peu utilisé  Mise au rebut du sulfure de mercure en tant que déchet dangereux
<b>Jerritt</b>	Technique fondée sur la conversion du mercure élémentaire en chlorure mercurique par réaction avec du chlore Cl <sub>2</sub> dissous	99,97 %	Rendement d'élimination du mercure très élevé	Mise au rebut des sous-produits conforme à d'autres articles pertinents de la Convention

<sup>a</sup> Données de performance fondées sur les données de la fonderie de cuivre-plomb-zinc de Rönnskärnsverken de Boliden, telles que présentées dans CEE-ONU 2013

#### 4.1.1 Autres considérations pour le choix du procédé de contrôle du mercure lors de la fusion et du grillage dans le secteur des métaux non ferreux

Les principes généraux pour le choix des MTD pour les catégories de sources ponctuelles figurant à l'annexe D sont décrits dans le chapitre d'introduction des présentes orientations. Nous abordons ici des aspects complémentaires de la chimie du mercure susceptibles d'influer sur le choix du type de technique de contrôle du mercure dans le secteur des métaux non ferreux. Ils n'ont aucun caractère normatif et peuvent être moins pertinents pour certains des métaux figurant dans l'annexe D, en particulier pour l'or.

Le mercure peut être présent dans les gaz de procédé résultant des opérations de fusion et de grillage sous forme élémentaire ( $Hg^0$ ) ou oxydée ( $Hg^{2+}$ ), et dans les gaz ou la phase particulaire. Dans de nombreux cas, le mercure oxydé est efficacement éliminé dans les systèmes normaux d'épuration des gaz utilisés dans ces procédés pour contrôler les gaz acides ( $SO_2$ ,  $NO_x$ ) et les particules fines. Il est donc capital que la performance de ces procédés soit élevée pour atteindre une faible teneur résiduelle totale de mercure dans le gaz lavé. Ceci est particulièrement important pour les électrofiltres humides dans les systèmes d'épuration des gaz par voie humide. Il est aussi important de laver efficacement les gaz étant donné que la présence d'impuretés peut entraîner des réactions secondaires indésirables à l'étape de réduction du mercure. Par exemple, le filtre à sélénium de type lit fixe est sensible aux dépôts de poussières sur les particules actives poreuses.

Il est considérablement plus difficile d'éliminer le mercure élémentaire que le mercure oxydé, et la plupart des techniques commerciales sont conçues de manière à éliminer le mercure élémentaire en phase vapeur et dépendent d'un lavage classique des gaz en amont pour bien éliminer le mercure. L'étape de réduction du mercure est généralement installée lorsque la teneur en mercure de la charge ou les caractéristiques du minerai sont telles que le lavage classique du gaz ne suffit pas à éliminer des quantités de mercure suffisantes.

Le Tableau 4 récapitule certains des facteurs qui influencent la répartition du mercure dans un système d'épuration des gaz dans le secteur des fonderies.

**Tableau 4**

Quelques facteurs influençant la répartition du mercure dans un système d'épuration des gaz [d'après (Holmström *et al.* 2012)]

Caractéristique du gaz	Conséquence sur la répartition du mercure
Présence de Se, de $S^0$ ou de $H_2S_{(g)}$	Formation de $HgSe$ ou de $HgS$ (particules) → récupérées par un filtre à manches et un électrofiltre humide
Charge très élevée de $Hg$ élémentaire dans le système de refroidissement du gaz	Formation et condensation de $Hg$ élémentaire liquide dans l'ensemble du système
Température élevée du gaz après son refroidissement dans une tour BN	Génère une teneur en $Hg^0$ relativement élevée après la tour BN
Fonction de l'électrofiltre humide	Grande efficacité indispensable, au risque de retrouver des particules riches en $Hg$ dans l'acide
Présence de $Hg$ oxydé dans le gaz de procédé au niveau du filtre à manches	Génère plus de $Hg$ dans les poussières du filtre à manches

Les exigences de pureté des gaz pour les procédés de réduction du mercure sont environ les mêmes que celles des unités de production d'acide sulfurique. Dans le cas particulier du procédé Boliden-Norzinc (BN), les pressions de vapeur du mercure dans les liquides circulants sont sensibles à la température. De ce fait, la température des gaz à l'entrée doit être la plus basse possible. Le Tableau 5 présente les exigences normales pour le gaz à l'entrée pour l'étape de réduction du mercure des procédés BN, au thiosulfate et au filtre à sélénium.

**Tableau 5 : Qualité et propriétés des gaz requises à l'entrée de l'étape de réduction du mercure des procédés BN, au thiosulfate et au filtre à sélénium (données industrielles fournies par Outotec)**

Paramètre	Procédé BN	Procédé au thiosulfate	Filtre à sélénium
Poussières	max. 1 mg/Nm <sup>3</sup>	max. 1 mg/Nm <sup>3</sup> (après l'électrofiltre humide)	max. 10 mg/Nm <sup>3</sup>
Brouillard d'acide sulfurique	max. 20 mg/Nm <sup>3</sup>	max. 20 mg/Nm <sup>3</sup> (après l'électrofiltre humide)	max. 20 mg/Nm <sup>3</sup>

Température des gaz	max. 40 °C	non critique	max. 90 °C
---------------------	------------	--------------	------------

Outotec, principal distributeur de techniques de contrôle du mercure pour la fusion a décrit une approche pour le choix de la technique (Holmström *et al.* 2012) dans les cas où une élimination plus poussée du mercure des gaz est nécessaire. Les trois techniques décrites sont le procédé Boliden-Norzink, le filtre à sélénium pour une utilisation dans un lit statique avec des flux de gaz relativement faibles et un filtre au charbon actif pour une utilisation dans un lit statique ou l'injection de charbon actif en amont d'un filtre à manches. Selon Outotec, le choix (Holmström *et al.* 2012) est déterminé par les conditions du procédé et peut être simplement illustré par le schéma présenté dans la Figure .

Cette figure est fournie à titre d'orientation pour le choix d'une technique possible et peut ne pas s'appliquer dans de nombreux cas, par exemple, lorsque le concentré contient du sélénium. Une telle technique peut ne pas être indispensable lorsqu'un dispositif d'épuration de gaz est associé à des unités de production d'acide sulfurique pour un contrôle efficace des émissions de mercure, mais aussi de soufre.

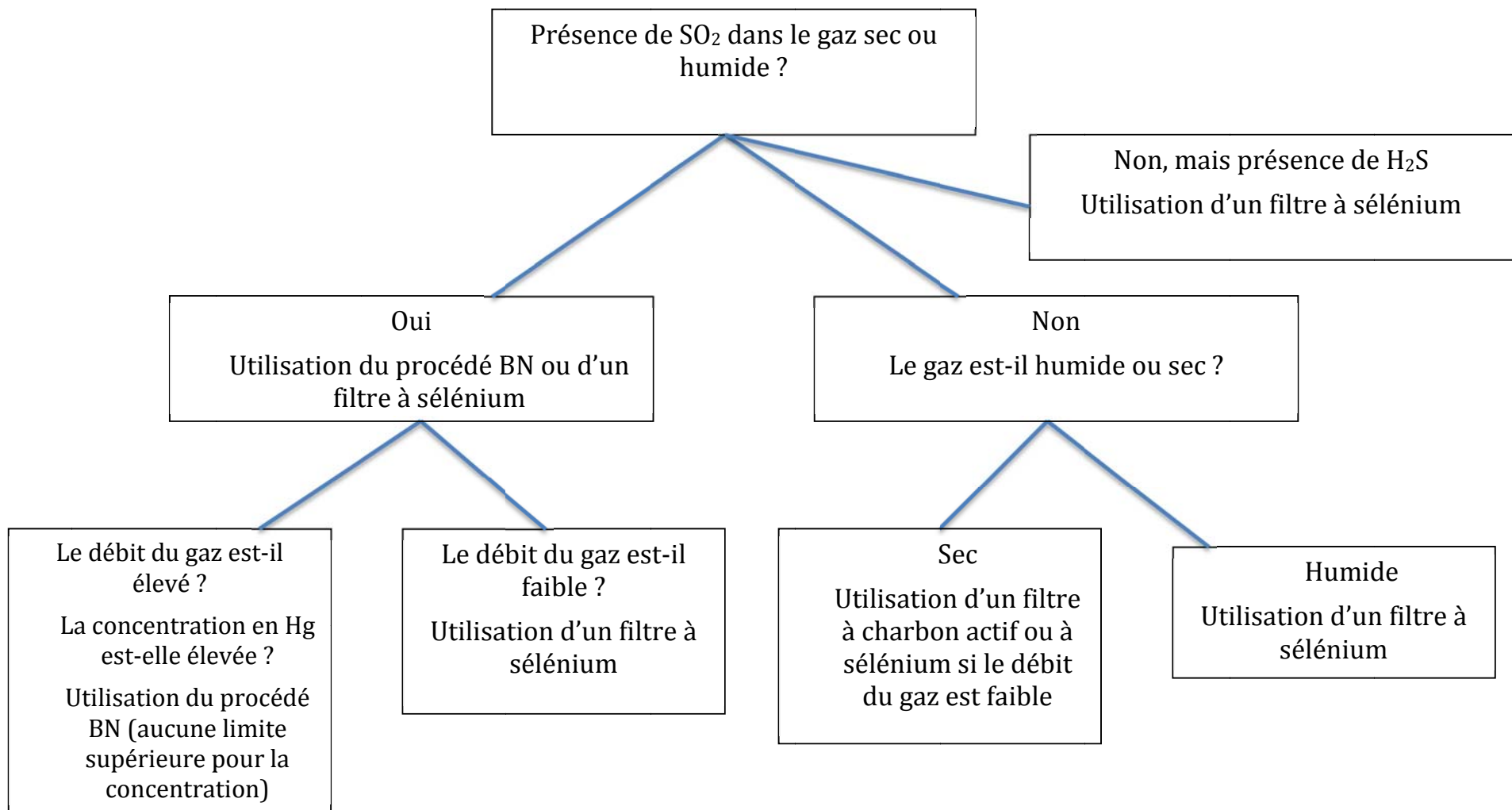


Figure 9 : Considérations pour le contrôle du mercure lorsqu'une élimination efficace du mercure est nécessaire et le choix inclut des procédés BN, de filtre à sélénium et au charbon actif.

## 4.2 Meilleures pratiques environnementales

Cette section décrit les meilleures pratiques environnementales (MPE) générales visant à contrôler, et lorsque cela est possible, réduire les émissions atmosphériques de mercure provenant des procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production des métaux non ferreux.

Pour l'élaboration et la mise en œuvre de MPE spécifiques, une planification soignée et l'engagement de tous les niveaux de l'entreprise sont nécessaires. L'élaboration de MPE peut être facilitée en tenant compte des réglementations, contrôles administratifs et pratiques de gestion pertinents des entreprises.

### 4.2.1 Systèmes de gestion environnementale

Un système de gestion environnementale est une approche structurée pour la gestion des aspects environnementaux d'une opération qui implique classiquement l'examen des objectifs environnementaux de l'entreprise; l'analyse de ses risques environnementaux, de ses effets et des exigences réglementaires; la définition d'objectifs et de buts environnementaux pour réduire les effets de cette opération sur l'environnement et se conformer aux exigences juridiques; la mise en place de programmes pour la réalisation de ces buts et objectifs; la surveillance et la mesure des progrès faits dans la réalisation des objectifs; l'assurance d'une prise de conscience des employés vis-à-vis de l'environnement et de leurs compétences en la matière; et l'examen de l'évolution du système et l'amélioration permanente de celui-ci. Les recommandations pour leur mise en œuvre sont, entre autres :

- Élaboration et mise en œuvre de programmes de maintenance préventive, prédictive et corrective pour l'exploitation efficace des systèmes d'élimination de la pollution;
- Entretien de l'équipement de production pour faciliter son fonctionnement normal et réduire à un minimum les perturbations du procédé;
- Amélioration de la gestion opérationnelle, élaboration de plans d'urgence, formation régulière des opérateurs;
- Exécution d'un programme de prévention des déversements et mise en œuvre d'une bonne organisation interne dans l'ensemble de l'installation;
- Établissement d'un plan de surveillance pour la mesure du mercure dans les étapes pertinentes du procédé;
- Élaboration et mise en œuvre d'un registre global des émissions de mercure au niveau pertinent du procédé et de l'installation.

### 4.2.2 Mélange de charges pour contrôler les émissions de mercure

Le mélange est un procédé opérationnel réalisé pour produire une charge stable et homogène en mélangeant des minerais ou des concentrés de qualité variable, combinant les minerais ou les concentrés avec des flux ou mélangeant différentes matières premières recyclées. On peut avoir recours au mélange pour contrôler les émissions de mercure quand des matières premières de fonderie présentent des teneurs en mercure très variables ou plus élevées que les teneurs souhaitées. Le traitement d'une charge stable et homogène facilite la mise en place de conditions opérationnelles à l'état d'équilibre dans lesquelles les contrôles de la pollution peuvent fonctionner d'une manière plus efficace. De plus, la plus faible teneur globale en mercure des matières premières de fonderie entraîne une réduction des teneurs en mercure du gaz résiduel et une diminution des émissions de mercure au niveau de la dernière cheminée. Dans certains cas particuliers, le minerai peut aussi avoir une très faible teneur en mercure et aucune mesure de contrôle supplémentaire n'est nécessaire pour obtenir de faibles émissions.

Dans le cas des sources qui pratiquent le mélange, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- Le mélange peut être une opération qui génère beaucoup de poussière et il convient d'utiliser des niveaux élevés de confinement, d'extraction de matières particulaires et de dépoussiérage. Les poussières collectées doivent être réintroduites dans le procédé;
- On peut aussi avoir recours à un mélange à l'état humide pour éviter la production de poussières. Dans certains cas, il se produit des boues qui sont ensuite déshydratées et utilisées dans un procédé de granulation;
- Pour obtenir les bons mélanges, il faut prendre au préalable des échantillons de chacune des matières premières afin d'en analyser la teneur du métal correspondant, y compris les impuretés comme le mercure. Les mélanges doivent être prévus en combinant les rapports de matières premières

adéquates d'après ces résultats. On peut utiliser des stations de mélange, des systèmes de dosage à perte de poids, des bandes doseuses et le suivi des volumes des charges pour obtenir des mélanges adéquats.

#### **4.2.3 Émissions atmosphériques de mercure**

Il convient de mettre en œuvre des mesures et des stratégies de contrôle pour réduire les émissions de mercure. La prudence est de mise lors de la conception des unités d'épuration des gaz, y compris des cheminées, pour s'adapter aux conditions topographiques et environnementales du site. Les émissions fugitives des sources ponctuelles doivent être piégées, lorsque cela est possible, dans des chambres fermées et des enceintes autour des unités. Les recommandations pour leur mise en œuvre sont, entre autres, les suivantes :

- Optimisation de la conception du procédé pour réduire les émissions dans le gaz résiduel et la teneur en polluants; fonctionnement en contenu lorsque cela est viable du point de vue technique et économique;
- Opération des fours et des réacteurs dans des conditions de pression négative et application de techniques adéquates d'épuration des gaz extraits;
- Étanchéisation des fours et des réacteurs et modernisation des fours existants pour maximiser leur étanchéité;
- Surveillance des paramètres pour éviter la condensation des gaz de combustion et la corrosion des circuits du fait d'une humidité excessive;
- Mise en œuvre d'un programme de détection des fuites et colmatage de ces dernières, le cas échéant;
- Mesures correctives sur les équipements qui génèrent des émissions fugitives importantes.

#### **4.2.4 Contrôle des matières particulaires**

Il est important de contrôler les matières particulaires (MP), car ces dernières contiennent du mercure. Il faut définir les méthodes de contrôle des MP lors de l'étape de planification et de surveiller les émissions. Les usines doivent améliorer en permanence les contrôles de MP pendant l'opération, notamment par les mesures suivantes :

- Identification et inspection régulière des sources potentielles de MP;
- Utilisation de systèmes d'extraction des poussières avec des contrôles adéquats des particules afin d'éliminer ces dernières des zones de travail et des bâtiments;
- Utilisation d'enceintes de pression négative sur les unités générant des MP pour prévenir un trop-plein de gaz contenant des particules;
- Installation de filtres à manches à plusieurs chambres afin de pouvoir les inspecter et en faire l'entretien en cours d'opération;
- Maintien de la performance du filtre à manches au moyen d'inspections et de remplacements réguliers des manches.

#### **4.2.5 Gestion écologiquement rationnelle et mise au rebut des déchets du contrôle de la pollution atmosphérique**

Afin de prévenir les émissions inutiles, les usines doivent utiliser les approches suivantes pour une gestion et une mise au rebut adéquates des résidus générés par les appareils de contrôle de la pollution atmosphérique :

- Stockage et transport en toute sécurité des déchets au mercure provenant des contrôles de la pollution atmosphérique (par exemple, mercure élémentaire à l'état liquide récupéré des cornues ou chlorure mercureux produit dans le procédé Boliden-Norzink);
- Commerce du mercure uniquement en conformité avec l'article 3 de la Convention;
- Mise au rebut des déchets au mercure conforme à d'autres articles pertinents de la Convention.

## **5 Surveillance du mercure dans les procédés de fusion et de grillage utilisés dans la production de métaux non ferreux**

Les aspects généraux et transversaux des activités de test, surveillance et information sont abordés dans le chapitre d'introduction du présent document. Les aspects spécifiques de la surveillance des émissions de mercure inhérents aux procédés concernant les métaux non ferreux sont abordés dans la présente section.

Dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux, les intrants susceptibles de contenir du mercure incluent les concentrés, les flux et le combustible. Outre les métaux finis, les flux de produits peuvent inclure des poudres et des composés métalliques, de l'acide sulfurique et des fertilisants. Les flux de sous-produits peuvent inclure des scories, du calomel (chlorure mercureux,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), alors que les flux de déchets peuvent inclure des scories, du calomel, des boues et des précipités provenant de l'équipement de contrôle de la pollution.

Les émissions de mercure peuvent sensiblement varier au fil du temps au sein d'une même installation ou d'une installation à l'autre appliquant des procédés similaires, du fait de la teneur en mercure variable dans les matériaux alimentant le procédé. Les teneurs en mercure peuvent changer rapidement dans les concentrés, les combustibles ou les autres apports comme les ferrailles. Lors de l'échantillonnage, la prudence est de mise, dans la mesure du possible, pour veiller à ce que le procédé se déroule dans des conditions stables représentatives des conditions normales de fonctionnement, que les teneurs en mercure des flux de matières premières sont représentatives des flux habituels et que les émissions fugitives sont réduites. Si les conditions opératoires ne sont pas typiques, l'extrapolation des données d'échantillonnage peut générer des résultats ayant une grande marge d'erreur.

Étant donné la diversité des procédés utilisés dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux, il peut y avoir d'importantes variations dans les procédés, même entre deux installations produisant le même type de produit métallique. Il convient de tenir compte des caractéristiques spécifiques au site au moment de sélectionner la méthode de surveillance la plus adéquate et de programmer la campagne d'échantillonnage. Outre la collecte de données sur les émissions de mercure, il est aussi recommandé de documenter la cadence de production des métaux.

### **5.1 Méthodes de mesure directe**

#### **5.1.1 Prélèvement par impacteur**

Le prélèvement par impacteur avec des produits chimiques humides est la méthode d'échantillonnage classique pour mesurer les teneurs en mercure des gaz produits lors de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux. En raison de la complexité et du coût de cette méthode, la fréquence des prélèvements par impacteur est réduite à une fois par trimestre ou par an. Même si cette méthode produit généralement des données fiables sur la durée de l'échantillonnage, ses résultats peuvent ne pas être représentatifs si les teneurs en mercure varient sur de courtes périodes.

#### **5.1.2 Pièges adsorbants et leurs systèmes de surveillance**

Dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux, la surveillance des pièges adsorbants peut être efficace pour obtenir des données sur les teneurs en mercure des gaz d'échappement au fil du temps. Même si cette méthode ne permet pas d'obtenir des résultats en temps réel, les données résultantes indiquent la performance opérationnelle au cours de la période préalablement définie. Cette approche de boucle de rétroaction permet de faire des ajustements au procédé en fonction des besoins.

La surveillance des pièges adsorbants est efficace lorsque les flux gazeux présentent de faibles teneurs en particules. Dans une installation de traitement de métaux non ferreux, la dernière cheminée est l'emplacement adéquat pour l'installation d'un système de surveillance des pièges adsorbants. À ce stade, le gaz nettoyé sortant de la cheminée doit présenter une faible teneur en mercure, particules et autres polluants.

#### **5.1.3 Systèmes de surveillance en continu des émissions**

Les systèmes de surveillance en continu des émissions (SSCE) de mercure ne sont pas encore largement utilisés dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux. Ils sont couramment utilisés pour mesurer de faibles teneurs en mercure lorsque les débits d'échappement sont élevés, par exemple dans le secteur des centrales électriques au charbon. Par comparaison, de nombreuses fonderies de métaux non ferreux émettent des gaz d'échappement chimiquement plus complexes avec des débits inférieurs et des teneurs plus élevées en mercure dans des flux gazeux plus complexes.

Dans les usines qui ont plusieurs cheminées, il pourrait être plus judicieux d'installer le SCCE au niveau de la dernière cheminée pour surveiller les rejets dans l'environnement. À la dernière étape du procédé, les gaz brûlés doivent avoir subi des lavages visant à éliminer la plupart des polluants atmosphériques, par exemple grâce à des contrôles des matières particulaires, au piégeage du mercure et à la production d'acide. Les données recueillies fourniraient des tendances indicatives en temps réel sur la performance opérationnelle. Si la quantité de mercure présent dans les flux d'alimentation est connue, le rendement d'élimination du mercure peut être calculé à l'aide des données de surveillance en continu des émissions.

## **5.2. Méthodes de mesure indirecte**

### **5.2.1 Bilan massique**

Même si le bilan massique fournit des données pour une période déterminée et non en temps réel, cette méthode peut être intéressante en tant qu'outil indicatif pour suivre la performance opérationnelle et le rendement d'élimination du mercure à condition que la teneur en mercure des charges, produits et autres flux importants soit suffisante pour permettre un calcul fiable.

Les pratiques opérationnelles normales dans une unité de fusion et d'affinage des métaux non ferreux devraient déjà inclure un échantillonnage et un dosage (analyse chimique) de la teneur en métaux des charges, produits et autres flux importants pour permettre un contrôle efficace du procédé. L'inclusion du mercure au titre d'analyte dans ces flux fournit des données essentielles à utiliser dans le bilan massique. Les informations sur la composition chimique du combustible acheté peuvent être obtenues auprès du fournisseur de combustible. Étant donné qu'une fonderie ou une affinerie réalise généralement au quotidien des dosages internes de la teneur en métaux aux points d'entrée et de sortie, l'installation doit envisager d'effectuer ses propres analyses du mercure malgré le surcoût.

Afin de calculer les émissions annuelles de mercure d'une installation à l'aide du bilan massique, les teneurs en mercure et les débits massiques de tous les flux doivent être suivis et enregistrés tout au long d'une année, ce qui implique un effort certain. De plus, il faut faire le suivi de tous les flux susceptibles d'accumuler du mercure. Les données de masse du mercure peuvent être calculées en multipliant la teneur en mercure par le débit massique du flux et l'intervalle de temps (par exemple, une année).

Du fait de la variabilité inhérente des mesures du débit massique du mercure et des mesures de l'accumulation du mercure, ainsi que de la multiplicité des flux entrants et sortants, il peut s'avérer difficile d'obtenir un chiffre définitif pour le bilan massique. Dans le cas des procédés bien contrôlés où le taux d'émission n'est qu'une fraction du débit d'alimentation, les mesures directes des flux d'échappement par le biais d'un échantillonnage sont plus indiquées que le calcul du bilan massique.

### **5.2.2 Systèmes de surveillance prédictive des émissions**

Les systèmes de surveillance prédictive des émissions (SSPE) ne constituent peut-être pas une méthode fiable de surveillance des émissions de mercure dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux. Dans ce secteur, la teneur en mercure des charges des fours peut varier sensiblement sur de courtes périodes selon les concentrations traitées. Même dans une installation traitant des concentrés provenant d'une seule mine, la teneur en mercure peut sensiblement varier en fonction de l'emplacement du front de taille au sein du gisement. De ce fait, l'établissement d'une corrélation entre des paramètres de substitution et les émissions de mercure peut ne pas produire des résultats représentatifs. Si on tient compte des SSPE, il convient de faire préalablement une analyse approfondie pour déterminer l'incertitude de la méthode au cas par cas.

### **5.2.3 Coefficients d'émission**

Dans le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux non ferreux, les émissions de mercure peuvent sensiblement varier au fil du temps au sein d'une même installation ou entre plusieurs installations utilisant des procédés similaires, en raison de la variation de la teneur en mercure des flux de matières premières. Ainsi, quand on utilise les coefficients d'émission, les estimations des émissions peuvent avoir des marges d'erreur élevées. En particulier, il faut tenir compte du fait que les estimations utilisant des coefficients d'émission généraux publiés ne sont que de grossières indications des niveaux d'émission. Une autre approche consisterait en l'élaboration de coefficients d'émission fondés sur des données d'échantillonnage réelles et des informations sur l'activité source.



## 6 References

- UNEP (2008). Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, 159 pp.
- UNEP (2013). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, vi + 263 pp.
- BREF NFM (2014). Best Available Techniques Reference Document for the Non Ferrous Metals Industries (BREF NFM), available at: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM\\_Final\\_Draft\\_10\\_2014.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf), IPTS, Joint Research Centre (JRC), European Commission, Seville, Spain, 1242 pp.
- Coleman, R.T.J. (1978). Emerging Technology in the Primary Copper Industry. Prepared for the U.S. EPA; data2.collectionscanada.ca/pdf/pdf001/p000001003.pdf; accessed on 7 April 2014, Habashi, F. (1978). Metallurgical plants: how mercury pollution is abated. *Environmental Science & Technology* 12, pp. 1372–1376.
- Holmström, Å., L. Hedström, A. Målsnes (2012). Gas Cleaning Technologies in Metal Smelters with Focus on Mercury. Sino-Swedish Cooperation on Capacity Building for Mercury Control and Management in China (2012–2013). Outotec.
- Hultbom, K. B. (2003). Industrially proven methods for mercury removal from gases. EPD congress, The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).
- Krumins T., C. Stunguris, L. Zunti and S Blaskovich (2013). Mercury removal from pressure oxidation vent gas at Newmont Mining Corporation's Twin Creek Facility. *Proceedings of Materials Science and Technology*. Montreal QC; The Minerals, Metals and Materials Society, 129-144
- Morgan, S. (1968). The Place of the Imperial Smelting Process in Non-ferrous Metallurgy.
- Reimers, J. H., et al. (1976). A review of Process Technology in Gases in the Nonferrous Metallurgical Industry for the Air Pollution Control Directorate, [nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91018I2W.txt](http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91018I2W.txt); accessed on 7 April 2014, Jan H. Reimers and Associates Limited, Metallurgical Consulting Engineers, Oakville, Ontario, Canada.
- Schulze, A. (2009). Hugo Petersen – Competence in gas cleaning systems downstream nonferrous metallurgical plants. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy – Sulphur and Sulphuric Acid Conference 2009, pp. 59–76.
- Sundström, O. (1975). Mercury in Sulfuric Acid: Bolden Process Can Control Hg Levels during or after Manufacture. *Sulfur* No. 116, The British Sulfur Corp., January–February 1975: pp. 37–43.
- Takaoka, M., D. Hamaguchi, R. Shinmura, T. Sekiguchi, H. Tokuchi (2012). Removal of mercury and sulfuric acid production in ISP zinc smelting. *International Conference on Mercury as a Global Pollutant*, Abstract 16-PP-107.
- UNECE (2013). Guidance document on best available techniques for controlling emissions of heavy metals and their compounds from the source categories listed in annex II to the Protocol on Heavy Metals, UN Economic Commission for Europe: Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 33 pp.