MPR 15133

DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS EN MATIÈRE D'ÉTUDES MINÉRALOGIQUES DU TRAITEMENT DES MINERAIS SULFURÉS COMPLEXES

W. Petruk et P.R. Mainwaring

Laboratoire de traitement des minéraux

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES MINÉRAUX
LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES

RAPPORT DU CANMET 85-12F

Octobre 1985

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/85-12F au Canada: 4,00 $
ISBN 0-660-91812-9 à l'étranger: 4,80 $

Prix sujet à changement sans préavis

Tous droits réservés. On ne peut reproduire aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (électronique, méchanique, photographie) ni en faire un enregistrement sur support magnétique ou autre pour fins de dépistage ou de diffusion sans autorisation écrite préalable des Services d'édition, Centre d'édition du gouvernement du Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9.

DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS EN MATIÈRE D'ÉTUDES MINÉRALOGIQUES DU TRAITEMENT DES MINERAIS SULFURÉS COMPLEXES

par

W. Petruk* et P.R. Mainwaring**

RÉSUMÉ

Le terme de "minerais sulfurés complexes" désigne généralement les minerais contenant plusieurs métaux communs, pyriteux, à grains relativement fins, d'origine volcanique. Dans ces minerais, les métaux ayant une valeur commerciale sont le cuivre, le zinc, le plomb, l'argent, l'or, l'étain, le cadmium, l'indium, le sélénium et le tellurium. On rencontre principalement ces métaux comme composants des minéraux suivants: chalcopyrite, sphalérite, galène, tétraédrite, cassitérite, électrum, et de nombreux sulfosels. On récupère par flottation les minerais métallifères sous forme de concentrés de cuivre, de plomb et de zinc, que l'on soumet ensuite à la fusion et au raffinage, pour en extraire les métaux. L'étude minéralogique des procédés nous fournit l'information fondamentale qui nous permet de concevoir les procédés d'enrichissement du minerai, les procédés métallurgiques d'extraction, les procédés pyrométallurgiques, ainsi que d'autres types d'installations pour traiter le minerai, les concentrés et d'autres produits. La mise au point de nouveaux appareils, comme un système d'analyse automatique des images SEM-IPS-IAS nous permet maintenant d'effectuer une rapide analyse quantitative des caractéristiques minéralogiques influant sur ces procédés de traitement. Autrefois, on pouvait tout au plus déterminer qualitativement ces analyses. Celles-ci nous ont permis de mieux comprendre le comportement des minéraux et des phases minérales durant le traitement, et donc permis d'atteindre un meilleur taux d'extraction des métaux dans les installations de traitement.

*Chercheur scientifique et **Chef de la Section de la minéralogie appliquée, Laboratoire du traitement des minéraux, Laboratoires des sciences minérales, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

RECENT DEVELOPMENTS IN PROCESS MINERALOGY OF COMPLEX SULPHIDE ORES

W. Petruk* and P.R. Mainwaring**

ABSTRACT

The term "complex sulphide ores" generally refers to the relatively fine-grained, pyritic, polymetallic base-metal ores of volcanogenic origin. The metals of economic value in these ores are copper, zinc, lead, silver, gold, tin, cadmium, indium, selenium, and tellurium. The metals occur principally as constituents of the minerals chalcopyrite, sphalerite, galena, tetrahedrite, cassiterite, electrum, and many sulphosalts. The metal-bearing minerals are recovered by flotation in copper, lead, and zinc concentrates, which are then smelted and refined to recover the metals. Process mineralogy provides fundamental information for designing mineral beneficiation, extraction metallurgy, pyrometallurgy, and other plants for treating the ore, concentrates, and other products. Recent developments of equipment such as the automatic SEM-IPS-IAS image analysis system has made it possible to perform rapid quantitative analysis of mineralogical characteristics that affect processing. Previously, these analyses could only be determined qualitatively or not at all. The analyses have provided a better understanding of the behaviour of minerals and phases during processing, leading to improved metal recoveries at processing plants.

*Senior Research Scientist and **Section Head, Process Mineralogy Section, Mineral Processing Laboratory, Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i
ABSTRACT ii
INTRODUCTION 1
CARACTÉRISTIQUES DES MINERAIS INFLUANT SUR LE TRAITEMENT DES MÉTAUX 1
Chalcopyrite 2
Sphalérite 2
Galène 4
Tétraédrite-tennantite-freibergite et boulangérite 4
Sulfosels d'argent et de bismuth 4
Or 4
Cassitérite et stannite 4
ÉTUDES DE MINERAIS, PAR EXAMEN MINÉRALOGIQUE ET ANALYSE D'IMAGES 4
Identité et composition des minéraux 6
Teneur en éléments traces 6
Dosage des minéraux et détermination de leur granulométrie 6
Méthode automatisée SEM-IPS-IAS 6
INSTALLATION DE PRÉPARATION DU MINERAI 8
Circuit de broyage 8
Circuit de traitement du cuivre 9
Circuit de traitement du plomb 9
Circuit de traitement du zinc 10
Circuit de traitement de l'étain 10
Fusion et raffinage du cuivre 11
Fonderie de plomb 11
Installation de traitement du zinc 11
BIBLIOGRAPHY 12

TABLEAUX

1. Minéraux communs des minerais complexes 2
2. Récupération de la chalcopyrite libre et non libérée lors d'un essai en laboratoire 8

FIGURES

1. Photographie SEM-BSE montrant de gros grains de chalcopyrite et d'étroites veinules de chalcopyrite (grise) dans de la pyrite (noire). Les zones blanches représentent la sphalérite 3
2. Sur l'écran cathodique (CRT) de l'analyseur d'images, visualisation de la chalcopyrite dans le minerai. Le noir correspond à tous les autres minéraux. On a isolé l'image de la chalcopyrite dans une image SEM-BSE qui montrait tous les minéraux 3
3. Comme à la figure 2, mais seuls de gros grains de chalcopyrite sont isolés 3
4. Comme à la figure 2, mais seules des veinules sont isolées 3
5. Comme à la figure 2, mais seuls de minuscules grains de chalcopyrite sont isolés 3
6. Sphalérite massive (grise) accompagnée d'inclusions de pyrite (blanche) 3
7. Sphalérite disséminée (grise) dans de la pyrite massive (blanche) ... 5

TABLE DES MATIÈRES (suite)

8. Grains arrondis minuscules et lamelles de chalcopyrite (blanche) dans de la sphalérite (grise) 5
9. Inclusions de galène (blanche) dans de la sphalérite (grise) 5
10. Inclusions minuscules de galène (encerclées) dans de la pyrite. Le gris correspond à la sphalérite 5
11. Diagramme montrant les types de particules constituant chaque classe de particules, et histogramme montrant les quantités (en % de la superficie) du minéral étudié présentes dans chaque classe de particules 7
12. Schéma général de fonctionnement du concentrateur utilisé pour le traitement d'un minerai sulfuré complexe 7

INTRODUCTION

On admet que le terme de "minerais sulfurés complexes" désigne des minerais d'origine volcanique, à grains fins, pyriteux, contenant plusieurs métaux communs. Dans ces minerais, les métaux ayant une valeur commerciale sont le cuivre, le zinc, le plomb et l'argent. En outre, certains corps minéralisés contiennent des quantités faibles à significatives d'or, et parfois des quantités récupérables d'étain. De plus, la plupart des corps minéralisés contiennent des quantités accessoires d'arsenic, et des traces d'indium, d'antimoine, de bismuth, de sélénium, de tellurium, de mercure, de cadmium, de manganèse et de cobalt. Les principaux éléments -- cuivre, zinc et plomb -- apparaissent surtout sous forme de composants des minéraux chalcopyrite, sphalérite et galène respectivement; les métaux précieux et éléments traces représentent soit d'importants constituants d'un grand nombre de minéraux présents en traces, soit des éléments présents en traces dans les principaux minéraux métallifères, ou les deux.

Le traitement comprend l'enrichissement des minerais pour concentrer les minéraux qu'ils contiennent, et les traitements pyrométallurgiques des concentrés pour en extraire les métaux. L'enrichissement consiste à broyer le minerai pour en libérer les minéraux et les concentrer, de façon à produire des concentrés de cuivre, de plomb, de zinc, et parfois d'étain. On récupère l'argent et l'or dans les concentrés de cuivre et de plomb.

Généralement, on soumet à la fusion et au raffinage les concentrés de cuivre, dans lesquels on récupère les sous-produits suivants: argent, or, sélénium et tellurium. On soumet aussi à la fusion les concentrés de plomb; on récupère l'argent, le bismuth et le cuivre qu'ils contiennent dans les lingots de plomb. On soumet les concentrés de zinc au grillage, à la lixiviation, au raffinage, à une nouvelle fusion, puis on les coule en barres de zinc; on récupère parfois les impuretés telles que le cadmium, l'argent et le cuivre, tandis que généralement, on laisse de côte l'indium, le manganèse et les autres éléments.

Pour obtenir un taux optimal de récupération des métaux, on doit connaître les caractéristiques du produit au fur et à mesure qu'il traverse l'usine de traitement, le concentrateur, la fonderie, et la raffinerie. On peut facilement obtenir à chaque étape du traitement un dosage chimique du produit, mais ce dosage n'indique que les quantités de minéraux ou de phases, non leurs caractéristiques. Pour concevoir l'usine de façon à obtenir un taux optimal de récupération des métaux, et conserver ce taux, on doit disposer d'informations sur les caractéristiques des minéraux ou des phases. Étant donné que l'étude minéralogique complète demande du temps, on ne doit l'effectuer que durant la préparation d'un corps minéralisé, durant les études de faisabilité et durant la conception de l'usine, et lorsqu'apparaissent des problèmes de teneur ou de récupération du minerai. On n'a pas autrefois utilisé de façon fréquente les examens minéralogiques en rapport avec le traitement des minerais, bien que certains instituts aient effectué ce type d'études pendant de nombreuses années (1-3). Toutefois, depuis une décennie, on utilise plus souvent ces recherches, en insistant davantage sur le type d'études que l'on doit réaliser pour résoudre les problèmes de traitement. Un examen minéralogique approprié des minerais sulfurés complexes permettrait donc de définir les propriétés des minéraux et des phases qui ont une influence sur le broyage et la flottation des minéraux métalliques, et sur la fusion et le raffinage des concentrés. On peut déterminer au moyen d'un microscope optique un grand nombre des propriétés des minéraux et des phases, mais pas toutes. Depuis deux décennies, on a mis au point une grande variété d'instruments permettant d'effectuer des examens minéralogiques et des études de phases, et l'on utilise de plus en plus ces instruments dans le cadre d'études en rapport avec le traitement des minéraux.

CARACTÉRISTIQUES DES MINERAIS INFLUANT SUR LE TRAITEMENT DES MINÉRAUX

On sait que dans les minerais sulfurés complexes, il existe des minéraux polymétalliques, mais dans la plupart des corps minéralisés de ce type (tableau 1), on ne trouve qu'environ 16 minéraux métalliques, 6 minéraux silicatés, et 3 minéraux carbonatés. Les principaux minéraux métalliques sont la pyrite, la chalcopyrite, la sphalérite, la galène, la pyrrhotine, l'arsénopyrite, la tétraédrite, la boulangérite et la cassitérite.

Tableau I - Minéraux communs des minerais complexes

Minéraux métalliques	Silicates	Carbonates
pyrite	quartz	ankérite
chalcopyrite	feldspaths	dolomite
sphalérite	minéraux argileux	calcite
galène	chlorite	
pyrrhotine	muscovite	
arsénopyrite	biotite	
tétraédrite		
tennantite		
freibergite		
magnétite		
boulangérite		
bornite		
covelline		
chalcocite		
cassitérite		
stannite		
pyrargyrite		
électrum		

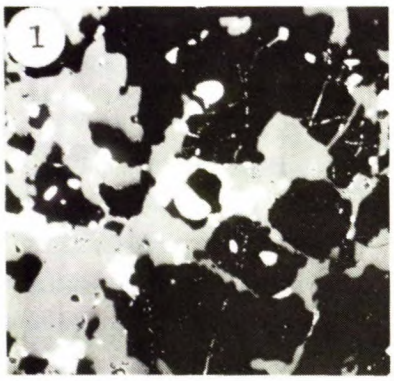
CHALCOPYRITE

La chalcopyrite se présente sous forme de gros grains dans la pyrite, la pyrrhotine ou la sphalérite, ou dans la pyrrhotine et la sphalérite; sous forme de réseaux de veinules dans la pyrite; et sous forme d'inclusions microscopiques dans la pyrite (fig. 1). Durant la préparation du minerai, on libère les gros grains par broyage, puis on les récupère dans le concentré de cuivre. La granulométrie de la chalcopyrite présente dans le minerai nous fournit l'information nécessaire pour calculer le degré de broyage requis, et le taux de libération auquel on peut s'attendre, avec un degré adéquat de broyage. La meilleure façon d'effectuer une analyse granulométrique est d'obtenir une image du produit avec un analyseur d'images, et d'isoler l'image du minéral en question (fig. 2). On peut encore mieux isoler l'image des gros grains de chalcopyrite de celle des veinules de chalcopyrite avec un analyseur d'images Kontron (fig. 3), et ainsi analyser les portions isolées des gros grains de chalcopyrite. On peut déterminer la granulométrie, soit par analyse de lignes, soit par analyse de surfaces. D'après l'analyse granulométrique, il est possible de calculer le taux de libération que l'on obtiendrait avec chaque fraction triée du minerai broyé, en employant le modèle de libération de King (4) pour l'analyse granulométrique par lignes, le modèle de Klimpel (5) pour l'analyse de surfaces, ou des modèles empiriques éprouvés (6,7). Une partie de la chalcopyrite qui se présente sous forme de veinules dans la pyrite est dégagée par le broyage, tandis qu'une partie adhère à la pyrite. Dans le second cas, la chalcopyrite enrobe les particules de pyrite, et les amène à se comporter comme la chalcopyrite. L'effet néfaste des veinules de chalcopyrite présentes dans la pyrite sur la teneur du concentré de cuivre, ainsi que sur les taux d'extraction des métaux, dépend de la proportion de chalcopyrite présente sous forme de veinules, et de la largeur de ces veinules. On peut séparer l'image des veinules de chalcopyrite de celles des autres formes de chalcopyrite avec l'analyseur d'images Kontron, et l'analyser séparément (fig. 4). L'analyse permet de déterminer la quantité de chalcopyrite présente sous cette forme, et sa granulométrie à l'intérieur des veinules les plus étroites. Les inclusions de chalcopyrite dans la pyrite (fig. 5) sont si petites, qu'on ne peut probablement pas les libérer et les extraire. Toutefois, on doit déterminer la quantité et la granulométrie de la chalcopyrite présente sous cette forme, pour caractériser la chalcopyrite non récupérable.

Dans les minerais sulfurés complexes, la chalcopyrite peut contenir des traces à plusieurs milliers de ppm d'argent, et quelques ppm de sélénium et de tellurium. On extrait généralement l'argent de la chalcopyrite durant le traitement métallurgique, comme sous-produit important, tandis que l'on peut récupérer le sélénium et le tellurium ou les laisser sous forme d'impuretés dans le cuivre. La présence de sélénium dans le cuivre réduit la qualité de ce dernier; par conséquent, il est important de déterminer sous quelle forme et en quelle quantité se présente l'élément en question.

SPHALÉRITE

La sphalérite se présente sous forme de couches de sphalérite, et de grains disséminés dans la pyrite (fig. 6 et 7). La sphalérite stratifiée est massive, mais les masses de ce minéral contiennent de nombreuses inclusions de pyrite, de chalcopyrite, de galène, de tétraédrite et de cassitérite, et aussi des groupements de grains de chalcopyrite microscopiques, arrondis ou allongés, généralement désignés par le terme de "maladie de la chalcopyrite" (fig. 8). Lorsqu'on réalise des analyses granulométriques pour évaluer le taux de libération de la sphalérite massive, on doit déterminer les dimensions de la sphalérite entre les inclusions (fig. 6). On ne peut effectuer ce travail que par analyse linéaire. Par contre, on peut effectuer l'analyse granulométrique des inclusions de sphalérite à l'intérieur de la pyrite massive (fig. 7), soit par analyse linéaire, soit par analyse de surfaces.



ig. 1 - Photographie SEM-BSE montrant de gros grains de chalcopyrite et d'étroites veinules de chalcopyrite (grise) dans de la pyrite (noire). Les zones blanches représentent la sphalérite.

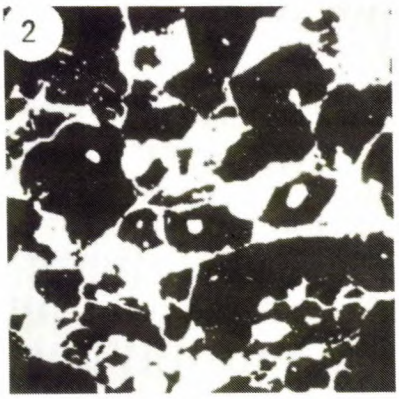
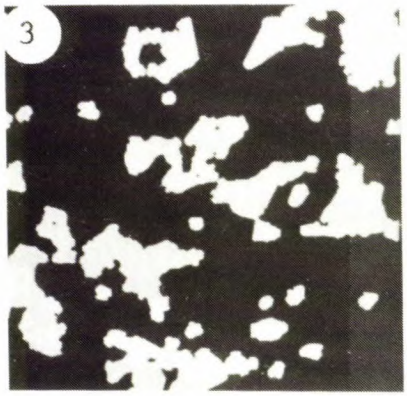


Fig. 2 - Sur l'écran cathodique (CRT) de l'analyseur d'images, visualisation de la chalcopyrite dans le minerai. Le noir correspond à tous les autres minéraux. On a isolé l'image de la chalcopyrite dans une image SEM-BSE qui montrait tous les minéraux.



ig. 3 - Comme à la figure 2, mais seuls de gros grains de chalcopyrite sont isolés.

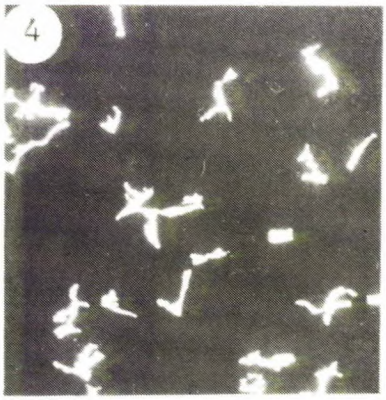
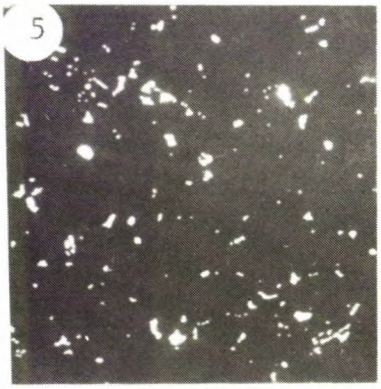


Fig. 4 - Comme à la figure 2, mais seules des veinules sont isolées.



ig. 5 - Comme à la figure 2, mais seuls de minuscules grains de chalporite sont isolés.

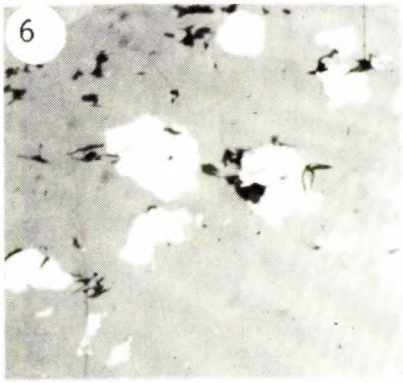


Fig. 6 - Sphalérite massive (grise) accompagnée d'inclusions de pyrite (blanche).

La sphalérite contient de l'argent, du cadmium, du manganèse, de l'indium et de nombreux autres éléments en quantités accessoires ou en traces. On peut déterminer la teneur moyenne de ces éléments présents en quantité accessoires ou en traces dans la sphalérite, en analysant un nombre statistiquement valable de grains à l'aide d'une microsonde, d'une microsonde ionique, ou d'un appareil micro-PIXE (d'émission de rayons X induite par protons).

GALÈNE

La galène se présente sous forme de grains irréguliers dans la sphalérite et la pyrite, et d'inclusions microscopiques dans la pyrite (fig. 9 et 10). Ce minéral étant généralement microgrenu, seule une faible partie est libérée, lorsqu'on broie le mineral pour dégager la sphalérite et la chalcopyrite. On doit effectuer des analyses d'images, pour déterminer la quantité d'inclusions microscopiques de galène dans la pyrite, la quantité de grosses inclusions de galène dans la pyrite, et la quantité de galène associée à la sphalérite et à la chalcopyrite. Les inclusions microscopiques présentes dans la pyrite ne sont pas extractibles; tandis que les grandes inclusions de galène dans la pyrite le sont, mais elles peuvent autrement répondre au traitement que la galène présente dans la chalcopyrite et la sphalérite. La galène contient des quantités significatives d'argent et de bismith en solution solide. Dans les minerais sulfurés complexes que l'auteur a étudiés jusqu'à présent, environ un tiers de l'argent est présent sous cette forme.

TETRAÉDRITE-TENNANTITE-FREIBERGITE ET BOULANGÉRITE

On désignera les minéraux en solution solide, du groupe de la tétraédrite-tennantite-freibergite, par le terme de tétraédrite. La tétraédrite et la boulangérite sont des minéraux accessoires des minerais sulfurés complexes. On peut facilement les prendre l'un pour l'autre durant un examen rapide avec le microscope optique, ces deux minéraux montrant les mêmes couleurs en lumière naturelle, bien que la boulangérite soit anisotrope et la tétraédrite isotrope. Généralement, la tétraédrite contient de l'argent, en concentrations variant de 0 à 35 % en poids. Pour déterminer la teneur moyenne en argent de la tétraédrite en analysant un nombre statistiquement valable de grains avec la microsonde électronique, ou un microscope électronique à balayage (SEM), équipé d'un analyseur quantitatif à rayons X en dispersion d'énergie (EDXA).

SULFOSELS D'ARGENT ET DE BISMUTH

Dans certains corps minéralisés, on rencontre une partie de l'argent et du bismuth dans divers minéraux de type sulfosels. Généralement, ces minéraux se présentent sous forme de grains minuscules, et beaucoup tendent à se perdre dans les produits rejetés par le concentrateur.

OR

On rencontre généralement l'or sous forme de grains minuscules d'électrum ou de phases contenant de l'or, de l'argent et du mercure. Les grains se présentent généralement sous forme de minuscules inclusions dans la pyrite et sous forme de filonnets à grains minuscules, le long de remplissages de fractures dans la pyrite, ainsi qu'aux limites entre les particules de pyrite et de chalcopyrite. On a observé que lorsque la teneur en or d'un mineral était très faible (<1 ppm), l'or se perdait dans les stériles, en même temps que la pyrite (8). Ceci suggère que l'or se trouve soit à des très faibles concentrations sous forme de solution solide dans la pyrite, soit sous forme d'inclusions microscopiques dans la pyrite.

CASSITÉRITE ET STANNITE

Dans les minerais sulfurés complexes, l'étain se présente généralement sous forme de grains minuscules de cassitérite, et parfois de grains minuscules de stannite. La cassitérite apparaît fréquemment sous forme d'inclusions microscopiques dans la sphalérite, tandis que la stannite est généralement associée à la chalcopyrite.

ÉTUDES DE MINERAIS PAR EXAMEN MINÉRALOGIQUE ET ANALYSE D'IMAGES

L'étude minéralogique complète d'un minerai, dans le cadre de la préparation des minéraux, consiste à définir le minéral hôte de chaque élément, et à évaluer le degré de broyage nécessaire pour extraire les minéraux. Lorsqu'on cherche à définir le minéral hôte (ou palasome), on doit identifier les minéraux, déterminer les compositions minérales et la teneur en éléments traces, et doser chaque minéral. Pour calculer le degré de broyage requis, une analyse granulométrique est nécessaire.

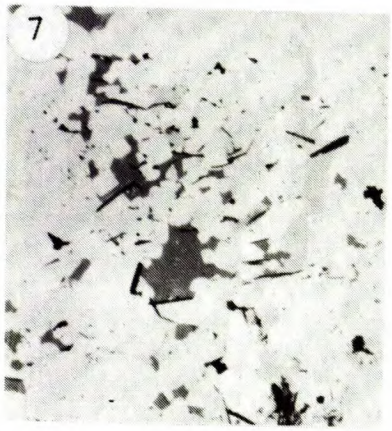
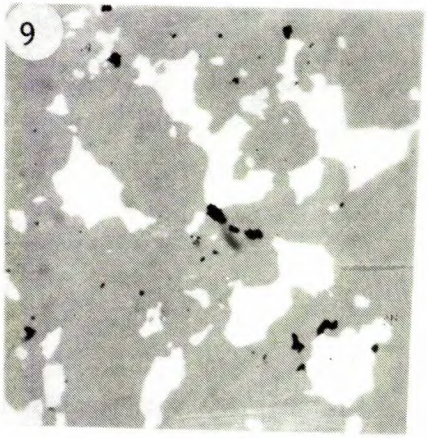


Fig. 7 - Sphalérite disséminée (grise) dans de la pyrite massive (blanche).

Fig. 8 - Grains arrondis minuscules et lamelles de chalcopyrite (blanche) dans de la sphalérite (grise).



ig. 9 - Inclusions de galène (blanche) dans de la sphalérite (grise).

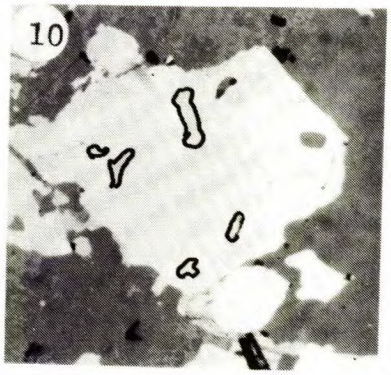


Fig. 10 - Inclusions minuscules de galène (encerclées) dans de la pyrite. Le gris correspond à la sphalérite.

IDENTITÉ ET COMPOSITION DES MINÉRAUX

On identifie généralement les minéraux au moyen d'un microscope optique, ou bien par diffractométrie X, ou au moyen d'un microscope électronique à balayage (SEM). On analyse la composition des minéraux au moyen d'une microsonde, ou d'un microscope électronique à balayage (SEM) équipé d'un analyseur de rayons X en dispersion d'énergie (EDXA). Les méthodes d'analyse que permettent ces instruments étant bien connues, il n'est pas nécessaire d'en traiter dans cet article.

TENEUR EN ÉLÉMENTS TRACES

On peut déterminer les teneurs en éléments traces des minéraux au moyen d'une microsonde, si elles dépassent 200 à 300 ppm, et au moyen d'une microsonde ionique ou d'un appareil micro-PIXE, si elles se situent entre 200 ppm et 5 ppm environ. Si les valeurs sont inférieures à 5 ppm, on ne peut les déterminer qu'en préparant un concentré monominéral et en analysant ce concentré par des méthodes à la fois chimiques et instrumentales, comme l'analyse de plasmas. Dans les minerais sulfurés complexes, les éléments traces importants sont l'argent dans la galène, l'argent dans la chalcopyrite, l'argent dans la sphalérite, l'or dans la pyrite, le bismuth dans la galène, le sélénium et le tellurium dans la chalcopyrite, et l'étain dans la pyrite (9). La teneur en éléments traces des minéraux varie considérablement d'un point à l'autre dans une particule minérale, et d'une particule à l'autre dans un minerai. Il est donc parfois nécessaire d'analyser de nombreux points, dans de multiples grains d'un minéral donné, pour obtenir une valeur se rapprochant de la teneur moyenne de ce minéral en éléments traces. Les quantités d'éléments traces dans les minéraux que contiennent les minerais sulfurés complexes varient de 1 à plusieurs milliers de ppm, mais se situent généralement entre 1 et plusieurs centaines de ppm.

DOSAGE DES MINÉRAUX ET DÉTERMINATION DE LEUR GRANULOMÉTRIE

On peut déterminer la composition quantitative, la granulométrie et le taux de libération des minéraux, au moyen d'un analyseur d'images. Les techniques utilisées pour effectuer l'analyse sont maintenant bien établies, mais la distinction automatique des minéraux présents dans les minerais sulfurés complexes présente encore un problème sérieux, surtout lorsqu'on emploie un microscope optique pour produire une image. Les valeurs de réflectance des minéraux individuels sont en effet si rapprochées de celles d'autres minéraux, que l'on ne peut suffisamment bien les distinguer pour une analyse minérale automatique. Quelques-uns des groupes problématiques de minéraux sont les suivants: chalcopyrite-pyrrhotine-galène, pyrite-arsénopyrite, et sphalérite-mangnétite. On peut en partie surmonter ce problème en couplant l'analyseur d'images à un microscope électronique à balayage, et en employant l'image électronique rétrodiffusée qui permet de différencier chaque minéral d'après son numéro atomique moyen. Cependant, même cette technique ne permet pas de distinguer tous les minéraux. Ce problème a été contourné par le professeur Jones (10) de la Royal School of Mines, et résolu par Reid (11) au CSIRO, et par les auteurs (12) au CANMET. Le professeur Jones utilise une microsonde Cameca équipée de spectromètres employant quatre longueurs d'onde. Il déplace la platine à des intervalles d'un micron sous un faisceau fixe, pour identifier les minéraux en chaque point, en fonction de quatre éléments. L'inconvénient de cette technique est que l'on effectue seulement une analyse linéaire. La méthode QEM*SEM employée au CSIRO et le système d'analyse d'images SEM-IPS-IAS employé au CANMET, disposent respectivement d'un microscope électronique à balayage (SEM) et d'une microsonde pour produire une image électronique rétrodiffusée (BSE). L'image est transmise à un analyseur d'images, et l'on distingue les phases suivant leur nuance de gris. S'il existe des couples de minéraux que l'on ne peut séparer de cette façon, on peut différencier un minéral de l'autre en dirigeant le faisceau électronique de la microsonde de façon à balayer automatiquement chaque particule et à l'identifier avec l'analyseur à rayons X en dispersion d'énergie (EDXA) d'après sa composition. Une fois que l'on a identifié les particules, on peut alors déterminer facilement avec l'analyseur d'images leur quantité, leur granulométrie, et le taux de libération des minéraux.

MÉTHODE AUTOMATISÉE SEM-IPS-IAS

Le système automatisé d'analyse d'images SEM-IPS-IAS employé au CANMET n'est pas encore décrit dans la documentation scientifique; on n'en donne donc

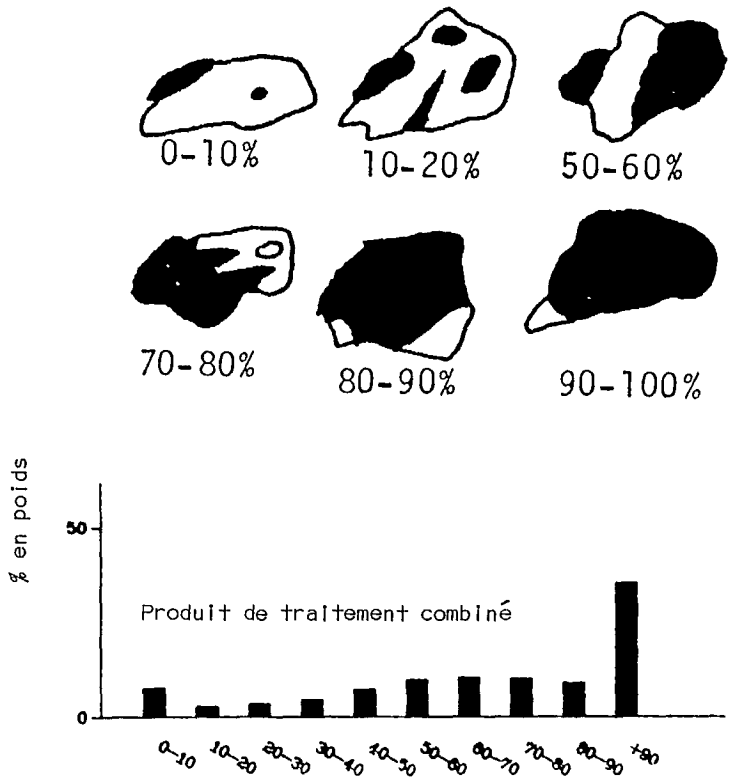


Fig. 11 - Diagramme montrant les types de particules constituant chaque classe de particules, et histogramme montrant les quantités (en % de la superficie) du minéral étudié présentes dans chaque classe de particules.

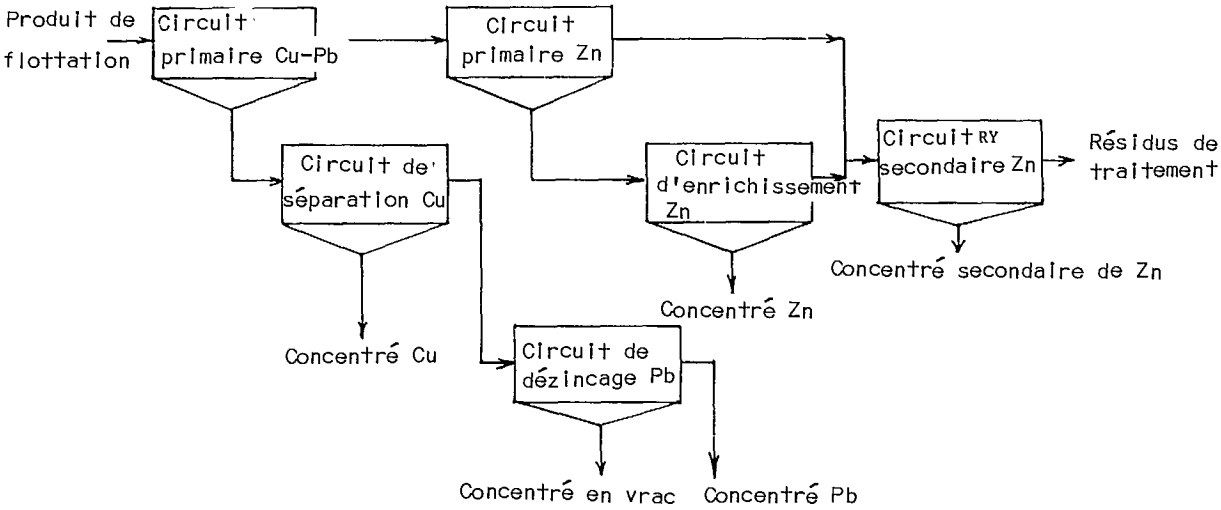


Fig. 12 - Schéma général de fonctionnement du concentrateur utilisé pour le traitement d'un minerai sulfuré complexe.

qu'une brève description dans cet article. Ce système comprend une microsonde équipée de spectromètres employant deux longueurs d'onde, d'un analyseur à rayons X en dispersion d'énergie (EDXA 2 000 Tracor Northern), et d'un analyseur d'images SEM-IPS. Ces appareils sont connectés avec un système de communication bidirectionnel. L'analyseur d'images dispose d'une mémoire intermédiaire 256-K et d'une mémoire à disques rigides de 10-M bits. Par conséquent, il peut enregistrer jusqu'à 14 images. L'image est produite au moyen de la microsonde, et visualisée sur l'écran cathodique de cette microsonde. On identifie les particules montrant des tons de gris différents, hors-ligne, avec l'analyseur de rayons X en dispersion d'énergie (EDXA). On recueille ensuite l'image au moyen de l'analyseur d'images. On enregistre dans une mémoire d'images séparée chaque minéral que l'on peut distinguer d'après sa nuance de gris. On enregistre dans les autres mémoires d'images les particules libres et les parties non libérées du minéral en question. On range les minéraux que l'on ne peut distinguer d'après leur nuance de gris, dans une "famille" de minéraux, à l'intérieur d'une autre mémoire ("famille"). On balaye avec le faisceau de rayons X de la microsonde chaque particule de cette mémoire "famille", et on l'identifie avec l'analyseur EDXA. La raison pour laquelle on ne balaye que les particules non identifiables d'après leur nuance de gris, au lieu de scruter toutes les particules, est la vitesse à laquelle s'effectue l'analyse. L'étape la plus lente de l'analyse d'images est le balayage des particules avec un faisceau de rayons X. Après avoir identifié les particules au moyen de l'appareil EDXA, on analyse l'image pour déterminer les propriétés physiques des particules.

INSTALLATION DE PRÉPARATION DU MINERAI

Les études minéralogiques auxquelles on doit soumettre les produits obtenus durant le traitement des minerais sulfurés complexes consistent à identifier les minéraux, à déterminer le taux de libération de ces minéraux, à déterminer la granulométrie des minéraux libres et des minéraux non libérés, et à classer les particules suivant la quantité du minéral qui nous intéresse, présente dans chaque particules. Cette information permettra de préciser les raisons de problèmes spécifiques dans les circuits, et nous apportera les données permettant de réaliser un bilan minéral-métaux. On peut utiliser le bilan minéral-métaux

Tableau 2 - Récupération de la chalcopyrite libre et non libérée lors d'un essai en laboratoire

Produit	% libre	% non libéré
Concentré de cuivre	68,3	22,2
1er laveur de concentré de cuivre	0,0	0,8
2e laveur du concentré de cuivre	0,7	1,2
Concentré de zinc	0,9	1,2
Résidu du laveur de zinc	0,1	0,8
Résidu final	0,0	3,8
Total dans le produit d'alimentation	70,0	30,0
Récupéré dans le concentré de cuivre	97,7	73,3

de plusieurs façons, en particulier pour évaluer le comportement des particules minérales libres dans un circuit. Cette évaluation nous indiquera si un procédé particulier convient pour traiter un minerai spécifique. Par exemple, le tableau 2 montre que 97,7 % de la chalcopyrite libre et 73,3 % de la chalcopyrite non libérée ont été récupérés dans le concentré de cuivre, lors de l'essai en laboratoire d'un minerai sulfuré complexe. La chalcopyrite libre représentait 70 %, et la chalcopyrite non libérée 30 % de la chalcopyrite présente dans le minerai.

La classification des particules suivant les concentrations dans ces particules du minéral étudié est un procédé utile pour définir les caractéristiques des minéraux dans un produit donné, et pour prédire comment le produit se comportera durant son traitement. La classification généralement adoptée comprend 10 classes de particules, les particules de chaque classe contenant diverses concentrations du minéral étudié. Cette classification comprend les classes 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, et 90-100 % du minéral étudié dans chaque particule. En général, on considère que les grains libres se situent dans la classe 90-100 % (fig. 11). On a constaté, en analysant de nombreux produits de traitement, que les grains contenant plus de 70 % du minéral étudié sont généralement récupérés dans le concentré, tandis que les grains de petite taille contenant moins de 30 % du minéral étudié tendent à se perdre dans les résidus. Les grains intermédiaires peuvent aller d'un côté ou de l'autre. Si les grains intermédiaires sont gros, ils peuvent être libérés par rebroyage.

CIRCUIT DE BROYAGE

Lorsque le minerai a été broyé, on doit l'analyser pour vérifier que le taux de libération des minéraux prévu par l'étude minéralogique a été at-

teint, et pour déterminer quelles proportions des minéraux étudiés se retrouvent dans les particules récupérables et les particules non récupérables. On doit aussi étudier le produit du circuit de broyage pour évaluer le rendement des broyeurs à barres, des broyeurs à boulets et des cyclones (13), et pour déterminer comment les minéraux se fragmentent durant le broyage. Les analyses minéralogiques et les analyses d'images faites en rapport avec l'étude du broyage consistent à déterminer le taux de libération des minéraux, à classer les particules, à réaliser des analyses granulométriques des grains libres et non libérés, et à déterminer la configuration de ceux-ci.

CIRCUIT DE TRAITEMENT DU CUIVRE

Le circuit de traitement du cuivre est le premier, dans la plupart des concentrateurs où l'on traite des minerais sulfurés complexes (fig. 12). Généralement, il contient des groupes de cellules de flottation où s'effectuent le dégrossissage, le balayage et le nettoyage. Le concentré de dégrossissage contient les minéraux cuprifères et plombifères, ainsi qu'un peu de spahlérite libre, un peu de pyrite libre, et quelques minéraux silicatés et carbonatés. La quantité relative de sphalérite libre est proportionnelle à la quantité relative de minéraux non cuprifères dans le concentré de dégrossissage. On nettoie généralement plusieurs fois le concentré cuprifère issu du dégrossissage. On rebroie le concentré de balayage, et on le renvoie au circuit d'alimentation. On envoie généralement le résidu de balayage dans le circuit du zinc, tandis que les résidus de nettoyage sont envoyés dans le circuit du plomb. Le concentré de cuivre récupère la chalcopyrite, la bornite, la tétraédrite, la stannite, de petites quantités de galène et de pyrite non libérées, et l'électrum libre. Les résidus de balayage qui représentent le rejet du circuit de traitement du cuivre, contiennent de la pyrite, de la sphalérite, de la pyrrhotine, de la boulangérite et de la cassitérite; dans certaines conditions, ils contiennent aussi des minéraux amenés lentement à la flottation comme l'acanthite, la tétraédrite pauvre en argent, les sulfosels argentifères et bismuthifères, et d'autres minéraux métalliques accessoires, ainsi que les silicates.

On a constaté que la présence simultanée d'environ 0,01 % en poids ou davantage, de covelline et de chalcocite dans le minerai, influe de telle sorte sur la flottation, que la chalcopyrite ne peut plus sélectivement flotter par rapport à la sphalérite et à la galène. On peut partiellement surmonter ce problème en ajoutant du cyanure de sodium dans le circuit de flottation (14,15). Toutefois, on ne parvient à déprimer la sphalérite qu'après avoir ajouté un excédent de cyanure de sodium, et que s'il existe du cyanure à l'état libre. Toutefois, cette technique n'est pas économique lorsque le minerai contient plus de 0,1 % en poids de cuivre, en raison de la présence simultanée de covelline et de chalcocite.
On doit analyser, par examen minéralogique et par analyse d'images, les produits que contient le circuit du cuivre, pour déterminer les quantités, la granulométrie et les caractéristiques de libération des minéraux de valeur commerciale qui s'y trouvent, et pour obtenir un bilan minéral-métaux relatif à la chalcopyrite, la galène, la sphalérite, la tétraédrite et l'or à l'état libre.

CIRCUIT DE TRAITEMENT DU PLOMB

Dans la plupart des installations, l'alimentation du circuit de traitement du plomb est assurée par les résidus du circuit de nettoyage du cuivre. Celui-ci contient la majeure partie de la sphalérite et de la pyrite qui ont été entraînées dans le concentré cuprifère issu du dégrossissage. Dans les minerais sulfurés complexes, la galène est généralement beaucoup plus fine que la sphalérite et la chalcopyrite; ainsi, une proportion élevée de la galène présente dans le concentré cuprifère issu du dégrossissage se trouve dans les particules combinées de galène et sphalérite et de galène et pyrite. Par conséquent, si l'on cherche à atteindre un taux élevé de récupération du plomb, il faut que le concentré de plomb soit de basse teneur. Un tel concentré de plomb contient habituellement de la galène, de la sphalérite, de la pyrite, de la tétraédrite, des sulfosels de plomb et d'autres minéraux. En général, on récupère environ un tiers de l'argent du minerai dans le concentré de plomb. Une grande proportion de l'argent présent dans le concentré de plomb se trouve en solution solide dans la galène, mais aussi en partie dans la tétraédrite, et dans d'autres minéraux argentifères.

On doit étudier, par examen minéralogique et analyse d'images, les produits présents dans le circuit du plomb pour déterminer les quantités, la granulométrie et les caractéristiques de libération des minéraux de valeur commerciale, et pour

obtenir un bilan minéral-métaux pour le plomb, l'argent, le zinc, le cuivre, le bismuth et l'or. On doit donc effectuer une analyse d'images et une analyse par microsonde. La façon dont l'or se présente dans le concentré de plomb est inconnue.

CIRCUIT DE TRAITEMENT DU ZINC

L'alimentation du circuit de traitement du zinc est assurée par les résidus des circuits de traitement du cuivre et du plomb. Le circuit du zinc dispose généralement de groupes de cellules de flottation de dégrossissage, de balayage, de nettoyage et de renettoyage, généralement en circuit ouvert avec une installation de rebroyage. Le produit d'alimentation contient environ 90 à 95 % en poids du zinc présent dans le minerai, et de petites quantités de cuivre, de plomb, d'argent et d'or. On récupère une partie du cuivre, du plomb, de l'argent et de l'or dans le concentré de zinc, mais on en perd une partie dans les résidus finaux. On récupère généralement dans le concentré de zinc environ 10 à 15 % de l'argent présent dans les minerais sulfurés complexes. Par conséquent, il est conseillé de déterminer la proportion d'argent qui dans le concentré de zinc se présente sous forme de minéraux distincts, et la proportion d'argent qui existe sous forme de solution solide dans la sphalérite. Des études préliminaires suggèrent que la sphalérite des minerais sulfurés complexes contient environ 20 à 50 ppm d'argent en solution solide, ce qui représente généralement environ 30 à 50 % de l'argent présent dans les concentrés de zinc. On a observé (16) qu'environ 25 à 40 % de l'argent des concentrés de zinc est soluble dans une solution cyanurée, mais on n'a pas établi avec certitude quel est l'hôte de l'argent. On a déduit que l'argent soluble se trouvait dans des grains d'acanthite de dimensions inférieures à 1 micromètre de diamètre (17). Il est possible que ces grains d'acanthite aient précipité durant le traitement du minerai. L'analyse par la méthode de spectroscopie AES (18) des surfaces de la sphalérite pourrait apporter quelques réponses à cette observation. La sphalérite de concentré de zinc contient quelques inclusions de galène et de chalcopyrite.

On a constaté qu'environ 10 % de la chalcopyrite qui se présentait sous forme de minuscules inclusions arrondies et de lamelles dans la sphalérite du minerai (fig. 8), existait encore sous forme d'inclusions minuscules dans la sphalérite du concentré de zinc (19). Les inclusions de chalcopyrite présentes dans la sphalérite du minerai sont si petites, que si les grains de sphalérite se fragmentaient au hasard, une fraction seulement de la chalcopyrite serait libérée. On a toutefois observé que la majeure partie des inclusions de chalcopyrite présentes dans la sphalérite du minerai sont apparemment alignées, suivant des plans cristallographiques spécifiques. Ceci suggère que durant le broyage, la sphalérite tend à se briser de façon préférentielle suivant ces plans, et que la chalcopyrite à se séparer de la sphalérite.

On a étudié par examen minéralogique et analyse d'images le circuit du zinc, dans lequel était traité le minerai de la Brunswick Mining and Smelting Ltd., pour déterminer si les caractéristiques minéralogiques indiquaient une façon possible d'améliorer la récupération du zinc. On a constaté qu'une importante proportion de la sphalérite présente dans les concentrés de balayage et de dégrossissage se présentait sous forme de grains non libérés, de 5 à 50 micromètres de diamètre environ. On a calculé, d'après les données fournies par l'analyse d'images, qu'en réduisant la dimension des particules contenant la sphalérite d'un facteur égal à deux dimensions de l'échelle de Tyler ($\sqrt{2}$), on libérerait assez de sphalérite pour améliorer la récupération du zinc d'environ 3 % (16). La compagnie a effectué une série d'essais de broyage et constaté qu'en améliorant le classement, elle améliorait la récupération du zinc d'environ 5 % (20).

CIRCUIT DE TRAITEMENT DE L'ÉTAIN

On traite parfois les résidus du circuit de traitement du zinc pour récupérer l'étain qui se présente généralement sous forme de cassitérite. Dans le minerai, la cassitérite est généralement présente dans la sphalérite sous forme d'inclusions de 2 à 25 micromètres de diamètre. Cette granulométrie s'explique par le fait que la plupart des grains de cassitérite ne seraient pas libérés, si la sphalérite se fragmentait au hasard durant le broyage. Toutefois, la majeure partie de la cassitérite rencontrée dans les résidus est libre. On en a conclu que durant le broyage, les grains minuscules de cassitérite - qui est un minéral dur - étaient séparés de la sphalérite, qui est un minéral beaucoup plus tendre. La concentration sur tables des matériaux à grains fins est un art. Par conséquent, la récupération de l'étain par concentration sur tables dépend largement de l'adresse de l'opérateur. La flot-

tation de la cassitérite libre pourrait être une solution désirable, et l'on fait actuellement des études à ce sujet au CANMET.

FUSION ET RAFFINAGE DU CUIVRE

Le procédé général de traitement d'un concentré de cuivre consiste à combiner ce concentré aux résidus provenant de l'installation de traitement du zinc, puis à le griller pour en expulser une partie du soufre et produire une matte ayant une teneur en cuivre de 35 à 50 % en poids. On soumet la matte à la fusion, et on la convertit en cuivre. On procède ensuite à la coulée d'anodes en cuivre que l'on soumet au raffinage. Le cuivre des anodes contient les métaux précieux, et aussi du sélénium, du tellurium et d'autres éléments traces sous forme d'impuretés. Un grand nombre des impuretés précipitent jusqu'au fond des cuves de raffinage sous forme de boues, que l'on traite ensuite pour récupérer les métaux précieux et les autres éléments. Les études minéralogiques des produits de grillage et de fusion, des anodes, des boues et du cuivre finalement obtenu nous fournissent l'information fondamentale qui nous permettra d'améliorer le rendement des procédés, d'améliorer le taux de récupération des métaux, et d'obtenir du cuivre et des sous-produits de première qualité.

FONDERIE DE PLOMB

La fonderie de plomb comprend généralement un appareil de frittage et un four. L'appareil de frittage sert à chasser le soufre et produit des silicates de plomb que l'on peut soumettre à la fusion. On mélange le concentré de plomb à de la silice, à du calcaire et à un combustible. Puis on le chauffe dans l'appareil de frittage où le plomb se combine à la silice et au calcium pour produire des silicates de plomb et des silicates calciques de plomb; le fer et le zinc se combinent pour donner des ferrites de fer et zinc. On fond ensuite le produit fritté dans le four. Durant la fusion, les silicates de plomb et les silicates calciques de plomb fondent; le plomb de même qu'un peu de cuivre, d'argent, de tellurium, de sélénium, de bismuth et d'or se séparent sous forme de métaux, qui sont entraînés dans le plomb coulé en lingots. Le fer, le zinc, le calcium et le silicium apparaissent dans le laitier sous forme de ferrites, de wustite, et d'un silicate de zinc et de calcium. L'arsenic, l'antimoine, une partie du zinc et une partie du plomb se combinent au soufre; on les retrouve aussi dans le laitier sous forme de sulfures, d'arséniures et de sulfantimoniures. Plusieurs douzaines de phases apparaissent durant la fusion dans le haut fourneau (21,22). On a étudié le produit formé dans un haut fourneau, en chargeant un caisson avec du produit fritté; on a immergé celui-ci jusqu'au niveau approprié dans le haut fourneau, puis on l'a laissé se stabiliser, on l'a retiré et laissé refroidir, et l'on a ensuite étudié les produits solidifiés (23). La meilleure façon d'identifier les phases présentes dans les produits issus des hauts fourneaux est d'utiliser un microscope électronique à balayage (SEM) équipé d'un analyseur qualitatif et quantitatif, à rayons X en dispersion d'énergie (EDXA). Au cas où l'on obtient de faibles taux de récupération, il est parfois possible d'en trouver la raison en identifiant les phases, et en déterminant leurs quantités et leur texture. Au cas où l'on retrouve d'importantes quantités d'impuretés dans les lingots de plomb, on devra déterminer les quantités et dimensions des phases dans les lingots en question, ce que l'on peut le mieux accomplir avec un analyseur d'images.

INSTALLATION DE TRAITEMENT DU ZINC

Généralement, on grille le concentré de zinc pour en expulser le soufre, et l'on soumet à la lixiviation le produit calciné. On obtient une grande variété de résidus dans l'usine de lixiviation, y compris un résidu de plomb et d'argent, un gâteau de cuivre, un produit cuprifère de cimentation, un résidu métallique de cadmium, et un résidu de jarosite, si l'on emploie le procédé de la jarosite pour éliminer le fer. On traite la solution lixiviante par électrolyse, pour précipiter le zinc sous forme d'anode de zinc. On soumet cette dernière à une nouvelle fusion pour augmenter la pureté du zinc, que l'on coule en blocs. Les études minéralogiques réalisées sur les phases du produit calciné, et sur les divers résidus de lixiviation, nous donnent de l'information utile pour améliorer le rendement de l'usine de traitement du zinc.

BIBLIOGRAPHIE

1. Timm, W.B., et Haycock, M.H. "The Mineragraphic Laboratory", Memorandum Series 58; Direction des Mines, Ministère des Mines, Ottawa, Canada, 1933.

2. Kerr, P.F. "Reminisences in Applied Mineralogy"; in Process Mineralogy I, préparé par D.M. Hausen et W.C. Park, AIME/TMS; New York, N.Y., 1981, p. 3-22.

3. Hiemstra, S.A. "The Role of Applied Mineralogy in Ore Beneficiation as Illustrated by Case Histories", Applied Mineralogy, préparé par W.C. Park, D.M. Hausen, et R.D. Hagni, AIME/TMS, New York, N.Y., 1984, p. 9-20.

4. King, R.P. "A Model for Quantitative Estimation of Mineral Liberation by Grinding", Int J Miner Process 6:207-220, 1979.

5. Klimpel, R.R. "Some Practical Approaches to Analysing Liberation from a Binary System", in Process Mineralogy III, préparé par W. Petruk, AIME/SME, New York, N.Y., 1984, p. 65-81.

6. Petruk, W. "Application of Quantitative Mineralogical Analysis of Ores to Ore Dressing", Institut canadien des mines et de la métallurgie Bull 69:767:146-153, 1976.

7. Malvik, T. "An Empirical Model to Establish the Liberation Properties of Minerals", 14 Int Mineral Processing Cong, Institut canadien des mines et de la métallurgie, Montréal, Canada, préimpression/8-2, 1982.

8. Chen, T.T., et Petruk, W. "Mineralogy and Characteristics that Affect Recoveries of Metals and Trace Elements from the Ore at Heath Steele Mines, New Brunswick", Institut canadien des mines et de la métallurgie Bull 73: 823:167-179, 1980.

9. Cabri, L.J., Campbell, J.L., Laflamme, J.H.G., Leigh, R.G., Maxwell, J.A., et Scott, J.D. "Proton-Microprobe Analysis of Trace Elements in Sulphides from Some Massive Sulphide Deposits", Can Mineral 23:2:133-148, 1985.

10. Jones, M.P. "Designing an X-ray Image Analyzer for Measuring Mineralogical Data", 14 Int Mineral Processing Cong, Institut canadien des mines et de la métallurgie, Montréal, Canada, Reminiscences 8-4, 1982.

11. Miller, P.R., Reid, A.F., et Zuiderwyk, M.A. "QEM*SEM Image Analysis in the Determination of model Assays, Mineral Associations and Mineral Liberation", 14 Int Mineral Processing Cong, Institut canadien des mines et de la métallurgie, Montréal, Canada, préimpression 8-3, 1982.

12. Mainwaring, P.R., et Petruk, W. "Automated Electron Microprobe Image Analysis: Application to Mineral Processing", Particulate Science and Technology, (sous presse).

13. Petruk, W. "Image Analysis Studies to Determine Liberations of Sphalerite, Chalcopyrite, and Galena During Grinding of Fine Grained Pyritic Zn-Pb-Cu-Silver Ores", 14 Int Mineral Processing Cong, Bur. recherches geologiques et minières, France, 1, 1985, p. 77-87.

14. McLean, D.C. "Upgrading of Copper Concentrates by Chalcocite Derimming of Pyrite with Cyanide", in Process Mineralogy III, préparé par W. Petruk, AIME/SME, New York, N.Y., 1984, p. 3-14.

15. Petruk, W. "Applied Mineralogy in Ore Dressing of Volcanogenic Massive Sulphide Ores", in Applied Mineralogy, edited by W.C. Park, D.M. Hausen, et R.D. Hagni, AIME/TMS, New York, N.Y., 1984, p. 279-290.

16. Petruk, W., et Schnarr, J.R. "An Evaluation of the Recovery of Free and Unliberated Mineral Grains, Metals and Trace Elements in the Concentrator of Brunswick Mining and Smelting Corp. Ltd.", Institut canadien des mines et de la métallurgie Bull 74:833:132-159, 1981.

17. Boorman, R.S., Petruk, W., et Gilders, R. "Silver Carriers in Concentrates and Tailings from Brunswick Mining and Smelting Corporation Limited", in Process Mineralogy III, préparé par W. Petruk, AIME/SME, New York, N.Y., 1984, p. 33-50.

18. Hagni, R.D. "The Application of Reflected and Luminescence Microscopy and the Auger Microprobe to Beneficiation Problems", 14 Int Mineral Processing Cong, Institut canadien des mines et de la métallurgie, Montréal, Canada, preimpression 8-7, 1982.

19. Petruk, W. "Predicting and Measuring Mineral Liberations in Ores and Mill Products, and Effect of Mineral Textures and Grinding Methods on Mineral Liberations", in Process Mineralogy VI, préparé par R. Hagni, AIME/TMS, New York, N.Y., (sous presse), 1986.

20. B.M.S. Engineers. Personal Communication with Metallurgical Engineers of Brunswick Mining and Smelting Ltd., 1985.

21. Petruk, W., Owens, D.R., Morris, D.R., et Amero, B. "Mineralogy of Phases in the Lead Blast Furnace of Brunswick Mining and Smelting", in Process Mineralogy III, préparé par W. Petruk, AIME/SME, New York, N.Y., 1984, p. 183-199.

22. Petruk, W., et Morris, D.R. "Impurities in the Lead Concentrate of Brunswick Mining and Smelting and their Behaviour in the Lead Blast Furnace", Institut canadien des mines et le la métallurgie Bull 78:878:113-122, 1985.

23. Morris, D.R., Amero, B.R., Evans, P.G., Petruk, W., et Owens, D.R. "Reactions of Sinter in a Lead Blast Furnace", AIME Metall Trans B 14B:617-623, 1983.