



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

## FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

## CONTACT

Please contact [publications@unido.org](mailto:publications@unido.org) for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at [www.unido.org](http://www.unido.org)



16525-F

Distr. LIMITEE

ID/WG.470/8

6 août 1987

FRANCAIS

Original : ANGLAIS

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

---

Première Consultation  
sur les industries des métaux non ferreux

Budapest (Hongrie), 30 novembre-4 décembre 1987

LE CHOIX DES TECHNIQUES  
DANS LES INDUSTRIES DES METAUX NON FERREUX\*

Document établi par le Secrétariat de l'ONU

23

---

\* Le présent document n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. Introduction	3
2. Technologies actuelles et nouvelles dans les industries des métaux non ferreux	4
2.1 Production de métaux non ferreux jusqu'au stade de l'affinage	4
2.2 Fabrication de demi-produits et de produits finis en aluminium et en cuivre	5
3. Principales orientations des activités de recherche et de développement	7
4. Considérations finales	9
<b>ANNEXE I</b> <b>CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX PROCEDES TECHNOLOGIQUES UTILISES DANS LES INDUSTRIES DES METAUX NON FERREUX</b>	<b>10</b>
<b>ANNEXE II</b> <b>RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT</b> Tableaux 1 à 3	<b>17</b>

## 1. Introduction

Les pays en développement diffèrent sans conteste beaucoup des pays développés par leur situation socio-économique, la qualité de leurs minerais une fois traités et les facteurs de production (par exemple, les infrastructures, la main-d'oeuvre qualifiée, les capitaux) dont ils disposent. Aussi les choix techniques qui conviennent le mieux dans les pays développés risquent-ils de ne pas être les plus avantageux pour les pays en développement. Tel est sans doute le cas surtout pour le choix des dimensions de l'usine envisagée.

Souvent, dans les pays en développement, les avantages que devrait comporter le choix de dimensions optimales pour une usine ne se matérialisent pas. Les problèmes particuliers que posent souvent les projets de grande dimension sont, entre autres, que :

- a) La construction d'une grande usine exige en général plus de temps, plus d'argent et plus d'efforts que celle d'une usine plus petite (mise en place des équipements nécessaires, des services auxiliaires et de l'infrastructure);
- b) Les grandes usines se heurtent en général à plus de problèmes techniques de fonctionnement que les petites; leur entretien est en général plus compliqué et les contraintes techniques y sont plus fréquentes;
- c) Le taux d'utilisation de la capacité de production tend à être plus faible dans les grandes usines que dans les petites, ce qui y élève la moyenne des coûts fixes;
- d) Les grandes usines dépendent beaucoup, en général, du niveau des exportations vers le marché mondial, alors que la demande diminue actuellement ou n'augmente que lentement, et que les prix baissent;
- e) Les grandes usines se prêtent moins que les autres au processus d'intégration du secteur des métaux non ferreux dans l'ensemble de l'économie, tant au niveau national qu'au niveau international;
- f) Les grandes usines exigent des investissements et des ressources financières d'un volume considérable, à une époque où nombre de pays en voie de développement souffrent d'endettement.

Les rapides modifications techniques que connaissent certaines industries de traitement des minerais ont aussi des incidences sur les installations que les pays en développement construisent à cet usage. Certains progrès - comme celui que représente la fonte en continu des feuilles et des bandes d'aluminium - permettent maintenant de prévoir des usines beaucoup plus petites qui auraient auparavant été jugées peu économiques, et beaucoup de pays en développement pourront donc commencer à orienter leur production vers la consommation intérieure.

Au contraire, certaines méthodes nouvelles - comme celle de coulée continue du cuivre - gênent les producteurs installés loin des principaux marchés, sur le plan de la compétitivité.

D'autres points doivent cependant être pris en considération lors du choix d'une technologie : la qualité du minerai, le prix de l'énergie, le coût du transport et l'augmentation possible de l'excédent de devises étrangères pouvant servir au développement des secteurs clefs de l'économie.

## 2. Technologies actuelles et nouvelles dans les industries des métaux non ferreux 1/

Les pays en développement devraient, compte tenu de leur situation socio-économique, utiliser à fond les nouvelles technologies pour tirer un meilleur parti de leurs ressources naturelles et viser à un développement plus intégré aux niveaux national et régional. A cet égard, il convient qu'ils accordent une importance particulière à l'analyse des nouvelles méthodes de fabrication des demi-produits et des produits finis.

### 2.1 Production de métaux non ferreux jusqu'au stade de l'affinage

Pour ce qui est de la production jusqu'au stade de l'affinage, il y a lieu de tenir compte de certains progrès techniques afin d'améliorer la productivité des installations en service ou envisagées.

Depuis les années 70, pour abaisser les coûts de production - notamment pour ce qui est de l'énergie - on en a modifié les schémas traditionnels de traitement des minerais à base de sulfure de cuivre à divers niveaux : augmentation de la taille des équipements d'extraction et de broyage pour réaliser des économies d'échelle; utilisation du procédé de la flottation en colonne pour concentrer les divers minerais en vue de leur séparation, surtout dans l'industrie du cuivre et pour la récupération du molybdène comme sous-produit de ce dernier; et intensification des procédés chimiques et pyrométallurgiques par des injections d'oxygène qui accélèrent les réactions, augmentent la capacité des fours et abaissent le prix de revient des produits.

Une technique particulièrement intéressante a été mise au point pour le traitement hydrométallurgique des minerais sulfurés ou oxydés; elle permet d'éviter les stades classiques, coûteux et polluants, de la concentration et de la fusion. Plusieurs pays s'intéressent aux progrès de celle qui permet de traiter les minerais cuprifères polymétalliques.

L'extraction de la bauxite, sa transformation en alumine et la production d'aluminium par électrolyse sont effectuées selon des techniques bien établies. Bien que ces procédés soient l'objet d'améliorations constantes, on ne s'attend pas à des modifications fondamentales avant la fin du siècle. Les récents progrès techniques tendent à diminuer le coût de l'énergie et à mieux utiliser les biens d'équipement dont le coût augmente sans cesse.

Dans les industries du plomb et du zinc, qui utilisent des minerais plus complexes et plus riches que celle du cuivre, mais en moins grandes quantités, des améliorations sensibles de la technique sont apparentes, pas tellement au stade de la concentration, où les procédés classiques et la concentration par flottation sont adaptés de manière appropriée à chaque minéral et aux problèmes métallurgiques qui se posent, mais plutôt au stade de la pyrométallurgie. Ici, outre les procédés spécifiques pour le traitement de chaque métal, il existe diverses solutions pour arriver à un traitement collectif de concentrés en vrac, qui améliore sensiblement la récupération de métal et les coûts. Du fait de la grande

---

1/ L'annexe I contient la liste des technologies nouvelles utilisables dans les industries des métaux non ferreux.

complexité des minerais et des grosses difficultés que comporte la séparation des divers métaux par flottation différentielle, les pertes de métal sont en général élevées. C'est pourquoi des procédés tels que l'Imperial Smelting et le Sulphate Roasting retiennent de plus en plus l'attention.

Parmi les nouveaux procédés pyrométallurgiques, il faut citer également : le procédé de lixiviation Sherritt, le nouveau procédé Kivcet (URSS), le procédé Outokumpu (Finlande) et le procédé QSL (RFA).

Tous ces procédés devraient être dûment pris en considération, vu que si tous les pays en développement ne sont pas à même de créer leurs propres installations, ils peuvent néanmoins conclure facilement des accords pour la création de quelques installations régionales qui traiteront très efficacement leurs productions combinées.

L'industrie de l'étain se trouve maintenant dans une situation délicate, du fait de la disparition du Conseil international de l'étain et de l'effondrement des prix de l'étain. On pourrait y remédier en ayant recours à des procédés plus rentables. Il existe notamment une méthode de flottation efficace et relativement bon marché pour les microparticulés d'étain. De même, on s'intéresse de plus en plus au procédé de la fumaison à cause de sa grande efficacité pour éliminer les impuretés et augmenter la récupération de métal pur.

Pour le nickel, les améliorations technologiques tendent à augmenter les économies d'énergie et le taux de récupération du métal. A cet égard, les pays en développement devraient prêter une attention particulière aux nouveaux progrès des procédés hydrométallurgiques, notamment au traitement à l'acide sulfurique des minerais latéritiques comme la limonite.

## 2.2 Fabrication de demi-produits et de produits finis en aluminium et en cuivre

La fabrication de demi-produits et de produits finis intéresse, semble-t-il, au plus haut point les pays en développement parce que les installations qu'elle suppose peuvent être de taille variable et que l'intégration horizontale aux niveaux national et régional peut s'en trouver facilitée.

Le choix des dimensions idéales d'une usine de demi-produits est difficile à faire. Le transport de ces derniers n'est parfois rentable que dans un périmètre très limité. Beaucoup, heureusement, peuvent être produits par des usines relativement petites. Tel est le cas, dans l'industrie de l'aluminium, des produits obtenus par extrusion. Par contre, ceux obtenus par laminage, qui peuvent être transportés sans inconvénient sur de longues distances, doivent être fabriqués en grande série, si l'on veut que leur production soit économique. Les laminoirs - y compris les laminoirs à chaud - pour être rentables, doivent avoir une capacité d'au moins 40 000 tonnes par an. Mais les laminoirs à froid peuvent être d'une capacité plus restreinte. Les installations de coulage-laminage, elles, peuvent être plus petites que les installations précédentes, et même être limitées à 10 000 tonnes par an, mais elles doivent comporter un four. Or, avec ce genre d'équipements, la gamme des demi-produits envisageables est plus réduite qu'avec les laminoirs classiques, et il est impossible de fabriquer certains produits à forte

teneur d'aluminium. Le mieux, c'est donc de disposer à la fois, dans la même usine, de laminoirs à chaud et de laminoirs à froid. Sinon, on se voit obligé d'envoyer le produit intermédiaire à l'extérieur pour qu'il soit laminé à froid. Il est courant, d'autre part, qu'on monte des usines de laminage à froid pouvant produire des bobines.

De nombreux pays en développement pourraient facilement fabriquer des produits finis à base de métaux non ferreux : des fils, des câbles, des ustensiles de cuisine et divers instruments, des containers, divers produits non ferreux destinés à l'industrie du bâtiment, etc.

S'agissant des demi-produits en cuivre, il convient, avant de choisir les principaux procédés de fabrication, de prendre en considération les points suivants :

- a) Les procédés de moulage en continu ont l'avantage de consommer moins d'énergie, d'exiger des investissements plus modestes, de moins polluer l'environnement, de permettre une capacité de production très souple et une productivité élevée, et de donner des produits de très bonne qualité;
- b) Les procédés de fabrication de tréfilés doivent être adaptés à la demande locale ou régionale;
- c) Les laminoirs à froid équipés de vis de serrage hydraulique et de régulation automatique de l'épaisseur peuvent présenter des avantages. Les laminoirs à chaud ne devraient être choisis que si la demande en est très forte ou dans des cas particuliers;
- d) Les presses indirectes présentent un certain nombre d'avantages, mais à l'heure actuelle les presses directes horizontales peuvent donner une gamme de produits plus large. Avec une presse à extrusion adéquate, on peut compenser la baisse de la demande de tréfilés en offrant des bobines de diverses tailles;
- e) Pour la fabrication des tubes de cuivre le procédé devrait être choisi en fonction de divers facteurs. Dans une usine disposant d'un laminoir à froid, une bonne solution pourrait être le façonnage de bandes en tubes, suivi d'un étirage sur toupie. Dans le cas d'une usine disposant d'une presse à extrusion, la solution optimale offrant une vaste gamme de production est la réduction sur des bancs à étirer. L'une des solutions les plus efficaces pour la production de tubes de taille moyenne ou petite est le moulage continu, le laminage à pas de pélerin et l'étirage sur toupie;
- f) Quand on envisage la fabrication de demi-produits en cuivre et alliages de cuivre ou en aluminium et alliages d'aluminium, il faut prêter une attention particulière au recyclage des déchets. Plus la séparation des déchets est poussée, plus leur valeur est élevée. On peut réaliser de grandes économies en utilisant chaque déchet de la manière la plus appropriée.

### 3. Principales orientations des activités de recherche et de développement

En ce qui concerne les domaines les plus prometteurs pour le progrès technologique dans les pays en développement, les principales lignes de recherche semblent être celles ayant trait aux points suivants :

- a) Meilleure utilisation des ressources polymétalliques, chaque fois que possible, avec extraction de tous les constituants utiles;
- b) Economies d'énergie et manipulation des matériaux dans les opérations d'extraction;
- c) Economies d'énergie et amélioration de l'efficacité dans les opérations de trituration, y compris le broyage semi-autogène et la séparation en cyclone;
- d) Améliorations sensibles dans la technologie de flottation, par l'utilisation de cuves de plus grand volume, l'introduction de nouveaux types de cuves, telles les colonnes, et l'utilisation de meilleurs réactifs;
- e) Plus grand recours aux procédés hydrométallurgiques, moins onéreux en énergie et en investissements, tels que les procédés de lixiviation bactérienne, extraction par solvant et réduction électrolytique;
- f) Adoption de procédés permettant de convertir le métal contenu dans des minerais sulfurés ou non sulfurés en métal brut avec la plus faible consommation possible d'énergie, comme le procédé SX/EW et le procédé de ségrégation;
- g) Amélioration de l'efficacité du procédé Bayer pour la production d'alumine, grâce à un meilleur ajustement des opérations de décantation et précipitation le cas échéant, intensification du lavage des boues rouges afin de réduire la consommation de soude caustique et obtenir un résidu moins dangereux pour l'environnement;
- h) Meilleure récupération des sous-produits dans toutes les phases de la production de métaux de base : séparation par flottation, par hydrométallurgie, pyrométallurgie et électrométallurgie. Divers métaux importants, tels que l'or, l'argent, le molybdène, le cobalt, le bismuth, le sélénium et le rhénium, le gallium et le vanadium constituent de précieux sous-produits qui permettent de réduire les coûts de production des métaux de base. On peut également récupérer avec profit des constituants non métalliques, tels que le soufre et l'arsenic;
- i) Organisation de la transformation et meilleure valorisation des produits intermédiaires. Le cas échéant, fabrication des produits suivants : produits abrasifs et réfractaires à base d'alumine; bauxite blanche artificielle; alumines spéciales; sulfates, oxydes, etc. de divers métaux; aluminium 99,99. Organisation de la récupération, de la transformation et de l'utilisation des métaux recyclés;
- j) Adoption de la technologie moderne d'oxygénation dans la fusion de métaux de base sous toutes les formes possibles, en vue d'optimiser les résultats du point de vue des économies et de la capacité de production;



- k) Réduction systématique des coûts dans les fours actuels à aluminium, par un meilleur contrôle de la composition des électrolytes, de la température et du fonctionnement des cuves;
- l) Possibilités de production d'un plus large éventail de demi-produits à partir d'alliages d'aluminium et de cuivre, grâce au moulage continu;
- m) Rénovation des laminoirs existants, en les équipant d'un dispositif de vissage hydraulique, de commandes électroniques de régulation et de systèmes de contrôle et de régulation automatiques des épaisseurs et des formes;
- n) Préparation d'études ayant trait à l'optimisation de l'échelle des opérations pour un procédé ou une technique donnés, qui pourra résulter d'une économie d'échelle ou d'une miniaturisation d'usines plus conforme aux besoins et possibilités du pays; conception d'équipements appropriés, surtout pour fabriquer des demi-produits;
- o) Etude systématique des avantages potentiels d'une expansion des installations actuelles, grâce à des technologies améliorées et intensifiées, au lieu de la construction de nouvelles installations.

L'introduction de nouvelles technologies dans les industries des métaux non ferreux des pays en développement exigera une collaboration assez poussée, selon des principes novateurs, des établissements de recherche existants, des universités et des centres de recherche nationaux, ainsi que des organismes de recherche industriels et des sociétés d'ingénieurs-conseils.

Plusieurs pays en développement possèdent des institutions de recherche et développement de haut niveau en ce qui concerne les industries des métaux non ferreux <sup>2/</sup>, qui pourront apporter une contribution importante en matière d'introduction de nouvelles technologies dans la pratique industrielle; ce sera particulièrement le cas pour l'évaluation de la viabilité de nouveaux procédés et techniques.

#### 4. Considérations finales

Ce sont les stratégies du développement et les contraintes financières qui, dans une certaine mesure, dictent le choix de telle ou telle technique.

A la lumière des considérations exposées dans le présent document, il serait du plus grand intérêt que les participants à cette réunion se penchent, entre autres, sur les points suivants :

- a) Améliorations techniques visant à augmenter la productivité des usines en place- qui fabriquent des produits non ferreux. A cet égard, analyse poussée des moyens de faire des économies d'énergie, de recourir plus souvent à l'hydrométallurgie et de traiter les minerais polymétalliques;

---

<sup>2/</sup> L'annexe II contient un aperçu des activités de recherche et développement dans le domaine des métaux non ferreux en Amérique latine, en Afrique et en Asie.

- b) Emploi de techniques de substitution pour la fabrication, dans les usines de petites et moyennes dimensions, de produits demi-finis et finis, techniques ne nécessitant pas des investissements trop importants;
- c) Définition des grandes lignes de la recherche et du développement pouvant être suivies par les industriels des métaux non ferreux dans les pays en voie de développement jusqu'à ce qu'ils en possèdent toutes les techniques;
- d) Coopération possible d'une part entre les pays développés et les pays en développement, d'autre part entre ces derniers, et pouvant les aider à faire augmenter la production des installations qu'ils possèdent déjà, à créer de nouvelles usines de demi-produits et de produits finis, et à maîtriser les techniques de l'industrie des métaux non ferreux.

ANNEXE I

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX PROCÉDES TECHNOLOGIQUES UTILISÉS  
DANS LES INDUSTRIES DES MÉTAUX NON FERREUX

1. Aluminium

L'extraction de la bauxite, sa transformation en alumine et la production de métal par électrolyse se font selon des techniques bien établies. Bien que les procédés soient constamment améliorés, on ne s'attend pas à des modifications fondamentales avant la fin du siècle. L'ampleur des réserves de bauxite actuellement connues ne constituera pas un obstacle à une nouvelle croissance de l'industrie de l'aluminium. L'application de méthodes modernes d'exploration à distance pourra faciliter l'identification de nouveaux gisements de minerais, notamment dans les pays en développement. Quoi qu'il en soit, la transformation en aluminium de bauxites pauvres et de minerais non bauxitiques pourrait avoir une importance locale, parce que certains pays peuvent souhaiter traiter leurs propres matières brutes.

Les problèmes d'énergie constituent un aspect prédominant de la production et de la consommation d'aluminium et déterminent donc les tendances du développement. Ce fait et le désir d'utiliser au mieux les biens d'équipement - étant donné leur coût croissant - sont à la base du développement des procédés Bayer et Hall-Héroult. Mis à part le facteur climatique, il n'existe pas de limitation technique à l'application de ces procédés n'importe où dans le monde, sous leur forme actuelle ou améliorée, à condition que les installations construites dans un pays puissent continuer d'être exploitées et entretenues, parce que lors de la conception d'une installation on a fait un choix raisonnable d'automatisation et de mécanisation et que le personnel a reçu une formation appropriée.

La protection de l'environnement étant de plus en plus un souci majeur, les nouvelles cuves électrolytiques sont du type à anodes précurées et utilisent de l'alumine anhydre. C'est pourquoi de nouvelles installations sont conçues pour produire ce type d'alumine et certaines installations en service sont transformées pour le produire. Les pays en développement possèdent surtout des gisements de gibbsite ( $Al_2O_3, 3H_2O$ ), dont la transformation en alumine anhydre ne pose aucun problème.

La taille des installations joue un rôle important dans l'économie de la production. La taille d'une usine d'alumine est passée de 120 000-150 000 tonnes par an à une capacité par ligne de production de 300 000-500 000 tonnes par an. De ce fait, la capacité des installations atteint souvent ou dépasse un million de tonnes par an. D'un autre côté, les cuves électrolytiques ont maintenant des capacités allant de 100 000 à 300 000 tonnes par an, la capacité de l'installation dépendant de la capacité par ligne de production.

Les progrès dans la fabrication de demi-produits semblent être plus dynamiques. Quoique les méthodes fondamentales de production soient bien connues depuis plusieurs décennies, on cherche constamment à améliorer l'efficacité des procédés et la qualité des produits. La taille des lignes de production de demi-produits est une question complexe. De manière générale, toutefois, elles peuvent fonctionner économiquement dans des installations de taille relativement faible.

Les capacités optimales, à peu de choses près, pour la fabrication à grande échelle de certains produits finis sont données dans le tableau 1.

Les dépenses d'investissement sont fonction du coût d'une cuve électrolytique. En comparant les valeurs données dans le tableau, on constatera que les coûts d'investissement spécifiques pour une tonne de produits finis peuvent varier fortement selon le type de produit considéré; ils peuvent être 5 à 6 fois plus élevés que pour l'obtention d'une tonne de métal (dans le cas des ustensiles de cuisine) ou une fraction de ce coût (dans le cas des cadres de meubles, échelles ou échafaudages). Un point, cependant, est particulièrement significatif : des capacités raisonnables pour ce type de produits peuvent être de l'ordre de 500-5 000 tonnes par an.

Tableau 1. Taille minimale, économiquement viable, des moyens de production et coûts d'installation

(cuve électrolytique = 100)

<u>Installation</u>	<u>Métal traité (pourcentage)</u>	<u>Dépenses d'investissement (pourcentage)</u>
Cuve électrolytique	100	100
Fabrication de produits finis		
Ustensiles de cuisine	0,1	0,6
Boîtes	2,25	7,2
Bouteilles de gaz liquéfié	2,0	3,6
Bidons	0,4	1
Radiateur :	0,75	1,1
Lampadaires	1,22	1,8
Fils conducteurs, non isolés	4,4	0,9
Câbles conducteurs, isolés	10	6
Conteneurs et réservoirs	1,2	2
Tubes pliables et flacons pour aérosols	5	6,5
Panneaux pour le bâtiment	0,7	0,6
Portails, petits bâtiments	1,0	0,4
Cadres de meubles, échelles, échafaudages	0,8	0,2

## 2. Cuivre

Actuellement, le cuivre est obtenu en majeure partie par les opérations suivantes : extraction, lixiviation des déchets et cémentation, concentration, fusion et affinage. L'extraction à ciel ouvert est plus courante que l'extraction souterraine et les morts-terrains (déchets) contiennent un peu de cuivre. On procède fréquemment à la lixiviation des morts-terrains pour en extraire le cuivre, que l'on peut récupérer de la façon suivante : passage de la solution sur un lit de ferraille, précipitation du cuivre métallique et dissolution du fer; la dernière opération est appelée cémentation.

Le minerai de cuivre extrait de la mine, qui contient souvent moins de 1 % de cuivre, est transporté au concentrateur, où il est d'abord concassé, puis broyé en solution aqueuse. La boue ainsi obtenue est envoyée dans les cuves de flottation, où les concentrés de cuivre forment une écume. Le produit ainsi obtenu est déshydraté par grillage, puis envoyé dans un four. Dans le four, les minerais sulfurés réagissent avec l'oxygène et on obtient alors du cuivre brut, de l'anhydride sulfuré et une scorie. Cette opération s'effectue en deux temps.

Dans le four à réverbère, le concentré de cuivre est fondu pour donner la matte et un mélange de sulfures de cuivre et de fer. Ensuite, la matte est envoyée dans un convertisseur où elle est traversée par un courant d'air; on obtient ainsi du cuivre brut et une scorie contenant le fer. Le cuivre brut est alors coulé en anodes sous forme de plaques, puis électrolysé; le cuivre pur se dépose sur les cathodes.

Il existe d'autres procédés hydrométallurgiques, notamment la lixiviation directe du minerai, suivie de la récupération du cuivre par cémentation ou électrolyse. Récemment, on s'est attaché à remplacer la fusion des concentrés par un traitement hydrométallurgique, afin d'éviter le coût élevé des installations de contrôle de l'environnement qu'exigent les nouveaux fours.

En vue de diminuer les coûts de production, notamment le coût de l'énergie, les opérations traditionnelles de traitement des minerais sulfurés (concassage, broyage, flottation, grillage, fusion et affinage) ont fait l'objet de modifications très importantes depuis le milieu des années 70. Les principales tendances sont évoquées ci-après.

Augmentation de la taille du matériel d'extraction et de trituration, en vue de diminuer les frais d'exploitation et d'entretien (économies d'échelle); intensification des procédés chimiques et pyrométallurgiques par injection d'oxygène, ce qui accélère les réactions et augmente la capacité des fours; remplacement de procédés pyrométallurgiques onéreux, à forte consommation d'énergie, par des procédés hydrométallurgiques moins coûteux, qui permettent des réactions chimiques à des températures moins élevées et un traitement plus poussé des matières premières.

Pour l'extraction proprement dite, les progrès techniques vont de l'utilisation d'explosifs plus sûrs et plus efficaces à l'utilisation de foreuses plus précises et plus mobiles. Dans la manutention des minerais, les progrès vont de l'utilisation de broyeurs mobiles dans la mine même à l'utilisation de flottes de camions géants et on se sert d'immenses courroies et de moyens de transport à fort tonnage et non plus de trains ou de camions de dimensions ordinaires.

Les opérations de séparation représentent plus de 50 % des frais totaux de trituration (concassage-broyage-classification-concentration-déshydratation): Les opérations de classification comportent généralement des opérations intermédiaires de séparation, après enlèvement de matières déjà réduites à une taille spécifiée.

A cet égard, une modification fondamentale de la technologie de classification est intervenue au cours des deux dernières décennies presque partout dans le monde : le remplacement des classeurs à plateaux inclinés par des hydrocyclones. Les énormes avantages des hydrocyclones sont : leur

efficacité de séparation, la faible consommation de pièces détachées, leur très faible taille, qui permet de doubler la capacité de production dans un même espace, et leur adaptation facile aux contrôles automatiques du circuit d'opérations.

L'autobroyage est le broyage du minerai par lui-même, plutôt que par des corps métalliques ou non métalliques distincts du minerai. Cependant, l'autobroyage n'est pas toujours satisfaisant pour le concassage et le broyage de grosses masses de roche, lorsqu'il y a des déficiences dans les constituants de la roche ou des modifications fréquentes de sa qualité. En pareil cas, pour assurer un broyage satisfaisant et régulier, on ajoute au minerai de gros boulets d'acier représentant de 2 à 10 % du volume total. A l'heure actuelle, la plupart de ces broyeurs semi-autogènes contiennent moins de 5 % en volume de boulets d'acier, tandis que les broyeurs classiques en contiennent 45 %. Dans la plupart des cas de traitement de cuivres prophyriques, qui portent sur des masses allant de 20 000 à 150 000 tonnes par jour, les broyeurs semi-autogènes remplacent les stades du concassage secondaire et tertiaire et du broyage dans des machines à barres.

Pour la concentration, une technique nouvelle a récemment été mise au point au Canada pour remplacer les cuves de flottation traditionnelles. Il s'agit de la flottation en colonne. Cette technique présente plusieurs avantages pour la séparation des divers constituants des minerais, notamment dans l'industrie du cuivre et pour la récupération du molybdène.

La principale caractéristique des colonnes de flottation est qu'elles n'ont pas d'éléments mobiles et que les solides sont maintenus en suspension uniquement par des bulles ascendantes.

L'hydrométallurgie, en particulier le lixiviation, s'est révélée être une méthode sûre, efficace et moins coûteuse pour plusieurs métaux, notamment le cuivre, l'or et l'uranium. Ces procédés chimiques peuvent être utilisés de diverses manières, par exemple pour la lixiviation in situ du minerai fracturé ou pour la lixiviation en vrac, où le minerai concassé est envoyé sur des lits spécialement préparés et arrosé avec des solutions qui peuvent être remises en circulation. La lixiviation peut être faite à la pression atmosphérique ou dans des vases clos, à une température et une pression élevées. L'agent de lixiviation peut être purement chimique, si l'on utilise un acide, de la soude caustique ou un cyanure, ou biologique, si l'on utilise des souches spéciales de bactéries. En fait, les bactéries n'assurent pas la lixiviation des minerais, mais les rendent propres à une lixiviation chimique ultérieure, en accélérant l'oxydation des minerais sulfurés.

La lixiviation est une technique relativement simple et peu onéreuse, que l'on peut facilement adopter du fait qu'elle demande peu de matériel sophistiqué. Les produits obtenus par lixiviation, que ce soit in situ, en vrac, en cuve ou par agitation, sont envoyés pour purification dans un appareil d'extraction par solvants, puis réduits à l'état métallique par électrolyse (dépôt sur cathodes).

Alors que les minerais sulfurés peuvent être lixiviés à peu de frais avec des solutions ferreuses associées à une lixiviation bactérienne, les minerais sulfurés étant traités par la méthode plus classique de la lixiviation chimique, la nouvelle méthode d'extraction par solvants offre la possibilité de purifier efficacement ces solutions pour l'électrolyse finale, qui produit des cathodes en cuivre très pur (99,9 %). Ce procédé extraction/électrolyse est maintenant très répandu dans les pays industrialisés tels que les Etats-Unis et le Canada.

Encore plus qu'ailleurs, les procédés permettant de réduire les coûts se sont généralisés en pyrométallurgie, où les coûts sont élevés du fait de la forte consommation d'énergie. Une manière de réduire les coûts est de diminuer la température de conversion des minerais en métal, comme c'est le cas avec le procédé dit de ségrégation.

Une autre manière d'améliorer le processus est l'injection d'oxygène, qui permet d'accélérer les réactions, d'augmenter la capacité des fours et, par conséquent, d'abaisser le prix de revient des produits.

Le nouveau procédé de fusion qui connaît le plus grand succès est sans aucun doute le procédé Outokumpu, qui assure en une seule opération le grillage, la fusion et une conversion partielle. Lorsqu'on utilisait uniquement de l'air préchauffé (à 450°C) pour augmenter la température créée par l'oxydation exothermique du sulfure de fer, les mattes ne contenaient que 45-50 % de cuivre et il fallait ajouter du mazout pour terminer la réaction. Avec l'apport d'air enrichi en oxygène, le processus est devenu entièrement autogène et la teneur en cuivre de la matte a augmenté, pouvant atteindre 65-70 %. Avec une matte à plus forte teneur en cuivre, on a pu réduire fortement la capacité des convertisseurs et la consommation d'énergie (de 40 à 50 %). En outre, l'addition d'oxygène réduit le volume des gaz et augmente leur teneur en anhydride sulfureux qui, de 10-15 %, peut passer à 30 %.

La souplesse du procédé de fusion en suspension - pour ce qui est du traitement de concentrés de composition variable et du contrôle de la teneur de la matte - est due au fait que le degré d'oxydation peut être réglé rapidement et facilement en modifiant le rapport concentré/oxygène.

Parmi les autres procédés modernes de fusion du cuivre, il faut mentionner les suivants : El Teniente, Inco, Mitsubishi et Noranda.

### 3. Plomb et zinc

La complexité des minerais de plomb et de zinc a entraîné l'adoption de nombreux schémas opérationnels destinés chacun à assurer la récupération rationnelle des composants métalliques formant les diverses combinaisons de minerais. Celles-ci, jusqu'à présent, ont été les suivantes : plomb-zinc-cuivre, plomb-zinc, cuivre-zinc et plomb-cuivre. La récupération totale des métaux dans des minerais aussi complexes dépasse rarement 80 %. Le taux de récupération est encore plus faible si minerais sulfurés et minerais oxydés se trouvent mélangés. En fait, la récupération par flottation ne présente aucune difficulté tant qu'il s'agit de concentrés en vrac; les pertes de métal commencent surtout dans la flottation sélective.

En conséquence, dans le traitement des minerais sulfurés complexes plomb-zinc, deux nouvelles démarches sont apparues ces dernières années : par l'une, on cherche à commencer le traitement pyrométallurgique des concentrés en vrac dès le début des opérations, sans séparation préalable des divers concentrés; par l'autre, on cherche à améliorer les procédés de traitement des divers concentrés.

Dans le premier cas, on évite les pertes excessives de métaux lors de la séparation par flottation; on en récupère 90-95 %, contre 80 % en moyenne par les méthodes classiques. Le meilleur, à cet égard, est le procédé Imperial Smelting, utilisé à ce jour dans 13 installations industrielles, avec une récupération totale d'environ 95 %. Mais dans certains cas, ce procédé ne permet pas de résoudre tous les problèmes. C'est pourquoi on met au point de nouveaux procédés chimiques pour obtenir les mêmes résultats.

Pour ce qui est de la fusion directe des concentrés, comme dans le cas du cuivre, deux types de nouveaux procédés sont à l'étude : ceux qui ont recours à la fusion dans un bain, tels que le procédé Boliden Kaldo et le procédé QSL; et ceux qui ont recours à la fusion en suspension, tels que le procédé Outokumpu et le procédé Kivcet.

Quoi qu'il en soit, il faut bien noter que ces nouvelles techniques doivent encore faire leurs preuves dans des établissements industriels.

#### 4. Etain

Etant donné la situation actuelle du marché de l'étain, il est particulièrement important pour cette industrie d'appliquer des méthodes économiquement plus efficaces. Parmi elles, il faut mentionner tout particulièrement le procédé de fumaison et une nouvelle méthode de flottation pour l'étain en microparticules.

Au cours des années 70, on a extrait une proportion croissante d'étain de gisements, du fait de l'épuisement progressif des sources d'étain alluvial. Il est devenu de plus en plus difficile d'obtenir, à partir de minerais provenant de gisements, des concentrés à forte teneur d'étain avec un taux élevé de récupération. Plutôt que de perdre une quantité croissante d'étain en cherchant à augmenter la teneur des concentrés, on a de plus en plus recours aux procédés de fumaison, qui donnent un concentré ayant une teneur moyenne - soit 40-50 % d'étain - avec des taux de récupération supérieurs à 90 %, alors que les méthodes classiques de traitement des minerais donnent des concentrés contenant environ 60 % d'étain, avec des taux de récupération de 50 % ou même moins.

Dans certains cas, les procédés de fumaison peuvent se substituer totalement aux méthodes classiques de traitement des minerais, dont ils tirent directement un concentré. Il est vrai que cela suppose des minerais à forte teneur d'étain; normalement, pour la fumaison, il faut qu'ils en contiennent au moins 7 %.

Pour essayer d'élever le pourcentage d'étain en fines particules obtenu par le broyage poussé qui libère la cassitérite, notamment lorsque celle-ci est étroitement liée à des minerais sulfurés, on a de plus en plus recours à la méthode de flottation, non seulement pour séparer les sulfures de la cassitérite, mais aussi pour séparer la cassitérite de la gangue. Bien que cette méthode de flottation permette d'augmenter sensiblement la récupération d'étain - de 20 % et davantage - le concentré ainsi obtenu n'en contient qu'environ 20 % et il faut alors avoir recours à d'autres méthodes de traitement.

#### 5. Nickel

Les traitements appliqués pour la récupération du nickel diffèrent sensiblement selon qu'il s'agit de minerais sulfurés ou de minerais latéritiques, du fait de leurs caractéristiques physiques. Des minerais sulfurés où le nickel, le fer et le cuivre se trouvent sous une forme distincte, on peut tirer, par des procédés mécaniques tels que la flottation et la séparation magnétique, une première concentration. Les minerais latéritiques ne se prêtant pas à ces procédés physiques d'enrichissement, il faut en extraire le nickel par des procédés chimiques. Les deux principaux types de minerais latéritiques se rencontrent dans les gisements de limonite et de serpentine.



Procédés pyrométallurgiques : les minerais sulfurés sont d'abord concassés et broyés jusqu'à ce que leurs particules soient d'une finesse permettant de séparer les sulfures de la gangue par flottation ou magnétisme. La plupart des minerais sulfurés sont ensuite soumis à une série d'opérations pyrométallurgiques : grillage, fusion et conversion.

Les minerais oxydés peuvent eux aussi être transformés par des procédés pyrométallurgiques : ils sont fondus avec un matériau sulfurant, par exemple du gypse, pour produire une matte fer-nickel, que l'on peut ensuite traiter de la même manière que la matte obtenue à partir des minerais sulfurés.

Les deux types de minerais peuvent être lixiviés avec de l'ammoniaque. Les minerais latéritiques du type limonite peuvent aussi être lixiviés avec de l'acide sulfurique. Ce procédé, à cause des économies et du taux de récupération qu'il permet, semble susciter un intérêt accru. Les minerais latéritiques du type serpentine servent surtout à produire du ferro-nickel. Parmi les techniques de production du nickel susceptibles de se développer, il convient de mentionner l'extraction directe du nickel par fusion plasmatique et sa séparation des solutions au moyen de solvants organiques.

ANNEXE II

RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

Tableau 1. Recherche et développement en Amérique latine

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Argentine	INTI	0,5	Extraction de Ni et Co.	14
Brésil	CEPED	13,0	Enrichissement, lixiviation biologique des minerais de Cu. Etude de l'incidence de l'extraction et de l'enrichissement du minerai de cuivre sur le milieu. Mise au point d'alliages de Cu destinés au monnayage.	160
Brésil	CETEM	2,0	Etudes sur des usines pilotes pour le traitement des minerais de Cu, Pb et Zn. Traitement des poussières de Sn. Flottation collective des minerais de Cu et de Ni. Affinage électrolytique de Cu par courant pulsatoire.	149
Brésil	GTP	0,5	Surveillance de l'environnement menacé par les industries de Cu et de Ni.	10
Brésil	IPT de S.Paulo	0,04	Extraction de Cu à partir des minerais oxydés.	2 600
Chili	CIMM	2,0	Traitement et métallurgie du minerai de Cu en en séparant Au (méthode dite "des petites mines"). Séparation de Mo et As. Récupération du rutile dans les résidus de Cu. Systèmes de transport hydraulique pour les solides.	300
Chili	INTEC	1,0	Lixiviation en tas des minerais de Cu, de Au et Ag. Concentration et récupération des déchets de Cu, Au, Co, W, etc., par gravitation.	72
Chili	INACAP	8,5	Formation pour le contrôle du traitement et l'automatisation dans l'industrie du cuivre.	121

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Chili	Sociedad Minera Pizarro Lida	non disponible	Exploration et enrichissement des gisements de Pb. Techniques de substitution pour Al et Pb. Alliages de Pb.	6
Chili	Universidad de Tarapaca	0,05	Contrôle non destructif, normalisation et contrôle de qualité des produits métallurgiques.	52
Colombie	CIDI	0,12	Récupération de Zn dans une usine sidérurgique.	15
Costa Rica	Instituto Tecnológico	0,04	Extraction des minerais de Al. Recyclage et affinage d'alliages de Al.	8
Equateur	Politecnica de Litoral	0,06	Mise au point d'alliages de Al. Recyclage et affinage des chutes. Electroformage de Ni pur. Alliages de Zn et Cu.	7
Jamaïque	Jamaïca Bauxite Institute	non disponible	Faciliter de traitement des bauxites boehmitique et goethitique de la Jamaïque.	26
Mexique	Instituto Politecnico Nacional, Esiquie, Laboratorios pesados de Ingenieria Metalurgica	0,23	Lixiviation des concentrés de métaux non ferreux. Sous-structures produites à des températures élevées. Optimisation des séquences du laminage des produits produits plats	50
Pérou	INGENMET	1,708	Exploration et évaluation des gisements (Cu, Pb, Zn, Ag); (Sn, W, Au). Problèmes que pose l'exploration souterraine, enrichissement des minerais. Flottation des minerais polymétalliques. Lixiviation bactériologique des minerais de Cu.	75

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Trinité-et-Tobago	Caribbean Industrial Research Institute	6,0	Mise au point de coulées expérimentales	60

Source : Directory of Research and Development Institutions ONUDI, Département de la promotion industrielle, des consultations et de la technologie, INTIB, 1987.

#### LISTE D'ABREVIATIONS

##### Instituts de recherche

CEPED	Centro de pesquisas e desenvolvimento
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
GTP	Centro de Tecnologia Promon
IPT	Instituto de pesquisas tecnologicas de Estado de Sao Paulo S/A
INTI	Centro de Investigación para las industrias minerales
CIMM	Centro de Investigación Minera y Metalurgica
INTEC	Comite de Investigaciones Technologicas de Corfo
INACAP	Instituto Nacional de Capacitacion Profesional
CIDI	Centro de Investigaciones para el desarrollo integral
INGENMET	Instituto Geologico Minero y Metalurgico
CMRDI	Central Metallurgical Research and Development Institute

Tableau 2. Recherche et développement en Afrique

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Egypte	ASSIUT University Department of Mining and Metallurgy	0,15	Production d'alliages Al-Ti et Al-Si. Enrichissement de néphéline-cyanite. Recyclage des matériaux dans l'industrie de Al	28
Egypte	CMRDI	0,7	Activation de bentonites. Régénération de cryolite. Mise au point d'alliages et procédés de protection des surfaces. Affinage de Cu. Recyclage de Pb	72
Egypte	TABBIN Institute for Metallurgical Studies	1,0	Coulées de Al de haute qualité. Résistance à la corrosion des coulées d'alliages de Al. Oxydation anodique - Traitement thermique des laitons	50
Kenya	Kenya Industrial Research and Development Institute	0,98	Analyse des fruits et légumes en conserve contaminés par le métal	45
Maroc	Direction de la Géologie	2,45	Prospection des gisements de métaux non ferreux - Recherches sur les métaux précieux associés à Cu et Pb.	300

Source : Directory of Research and Development institutions ONUDI, Département de la promotion industrielle, des consultations et de la technologie, INTIB, 1987.

Tableau 3. Recherche et développement en Asie

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Chine	General Research Institute for Non-Ferrous Metals	non disponible	Enrichissement des minerais, traitement et contrôle de la qualité et de l'environnement, technologies de substitution, fabrication de produits de Al et de Cu. Recyclage.	1 200
Chine	Institute of Metal Research, Academia China	3,5	Mise au point d'alliages à base de Al et de Ni, tubes et fil de cuivre. Contrôle de la qualité dans la production de Al et de Ni.	1 200
Chine	Shenyang Aluminium and Magnesium Research Institute	non disponible	Prospection et enrichissement de la bauxite au diaspore. Exploitation à ciel ouvert. Ingénierie intéressante: l'industrie de Al, notamment les installations de traitement principales et auxiliaires.	900
Inde	College of Engineering, Department of Metallurgy PUNE	1,8	Etudes sur les configurations des alliages Ni-Ti. Forgeage liquide des alliages de Al. Liaison par rouleaux Al/Al et Al/Cu.	12
Inde	Indian Institute of Science	0,9	Alliages obtenus mécaniquement de Ni, Cr, ThO <sub>2</sub> ; alliages de Al contenant Mn et Li. Coulées de Al, Cu, Zn. Lixiviation bactérienne de minéraux sulfurés pauvres.	350
Inde	India Lead PVT Ltd	0,0126	Amélioration de l'affinage. Désargentation. Alliages Pb-Sc, Ca-Pb.	15
Indonésie	Mineral Technology Development Center, Department of Mining and Energy	2,0	Enrichissement de minerais complexes pulvérulents et sulfurés. Flottation de la galène. Production de sulfate de Al. Etudes sur le degré de stabilité du minéral de Sn primaire.	106

Pays	Nom de l'institution	Ressources en millions de dollars EU 1985	Activités	Personnel
Malaisie	Geological Survey Department	5,39	Prospection et évaluation des gisements.	127
Pakistan	Metal Industry and Development Centre	non disponible	Mise au point d'alliages de métaux non ferreux. Procédés de fusion et de coulée. Sables de moulage.	7
Pakistan	Minerals and Metallurgy Division PCSIR	non disponible	Remplacement des minerais importés et des produits connexes. Enrichissement des minerais de Pb antimonieux.	34
Philippines	Metals Industry Research and Development Centre	1,2	Coulées de Al, de Cu. Galvanoplastie.	128
République de Corée	Korea Institute of Energy and Resources	0,14	Origine et prospection des gisements de métaux non ferreux du pays.	10
République de Corée	Korea Institute of Machinery and Metals	19,0	Mise au point de coulées de superalliages à base de Ni pour la fabrication de turbines à gaz.	620
Thaïlande	The Metalworking and Machinery Industries Development Institute	non disponible	Couleurs des bijoux, coulée centrifuge.	7
Thaïlande	Regional Centre of Mineral Resources	0,027	Prospection des gisements et enrichissement des minerais de Pb, Zn, Sn et Ni.	9

Source : Directory of Research and Development Institutions. ONUDI, Département de la promotion industrielle, INTIB, 1987.