# La minéralurgie

R.-J. Testut *

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, on n'exploitait pour les besoins de la métallurgie que des gisements de minerais riches, nécessitant tout au plus des triages grossiers pour obtenir les teneurs requises pour l'extraction du métal par fusion. Il y avait bien quelques exceptions, celles des métaux précieux essentiellement, l'or et l'argent ou plutôt le plomb argentifère qui depuis la plus haute antiquité ont été concentrés par gravité.

Depuis, les besoins en métaux se sont accrus très rapidement et les gisements de minerais riches se sont épuisés. On a donc dû avoir recours à des minerais de teneur de plus en plus basse et il a fallu généraliser les procédés de triage et de concentration permettant, en séparant les minéraux de valeur de ceux de la gangue, d'obtenir des concentrés à haute teneur ayant la composition requise pour permettre les traitements métallurgiques.

Pour les éléments les plus abondants de l'écorce terrestre, comme le fer, on disposera encore pour longtemps de gisements de minerais riches, mais même dans ce cas, les avantages indiscutables qu'il y a à alimenter les fours métallurgiques avec des minerais de haute teneur en fer et de composition contrôlée pour les autres éléments, conduisent à procéder de plus en plus à leur enrichissement. C'est actuellement le cas pour environ 15 % des minerais de fer exploités dans le monde, en particulier pour la presque totalité des minerais de fer américains.

On a longtemps appelé préparation mécanique des minerais ces traitements permettant de séparer les espèces minérales de valeur, et fournissant d'une part des concentrés marchands et d'autre part des rejets. Préparation dite mécanique parce qu'elle comportait essentiellement des opérations de concassage et de broyage qui avaient pour but de libérer les espèces minérales de valeur, et des triages utilisant les propriétés spécifiques des minéraux pour obtenir leur séparation : densité, magnétisme, conductibilité, propriétés chimiques superficielles utilisées dans le procédé de flottation.

* Directeur du service Recherche de la Société minière et métallurgique de Penarroya.

L'introduction des méthodes chimiques de traitement, rendues nécessaires par l'impossibilité de séparer par broyage les constituants extrêmement fins de nombreux minerais actuellement exploités, a conduit à adopter une désignation moins restrictive et le terme de minéralurgie a été choisi, reprenant d'ailleurs un vocable ancien mais qui était tombé en désuétude.

## Depuis 1910

Quand on considère l'évolution de la minéralurgie au cours des dernières années, on est frappé par l'extrême stabilité des procédés dont les principes n'ont pas changé depuis l'invention de la flottation et sa mise au point entre 1910 et 1920. Par contre, d'innombrables perfectionnements et améliorations apparaissent chaque année, qui élargissent progressivement les domaines d'application des techniques en usage et en augmentent les rendements tout en contribuant à réduire les dépenses d'investissements et les prix de revient.

Cette stabilité des techniques minéralurgiques s'explique par l'ensemble des impératifs auxquels elles doivent satisfaire et dont les principaux sont la nécessaire rusticité, la souplesse et la modicité des coûts.

A ces exigences qui limitent les chances de succès des découvertes et expliquent l'évolution lente des techniques minéralurgiques s'ajoute un facteur lié au caractère original de nombreux gisements, et par suite au fait qu'une méthode imaginée et mise au point pour un minerai donné risque de n'avoir qu'un champ d'application limité.

L'évolution des techniques minéralurgiques doit dans l'avenir permettre de faire face aux nouveaux problèmes posés par la disparition progressive des gisements faciles et par les exigences du respect de l'environnement.

Le traitement de minerais plus pauvres exige la mise au point de techniques à très bas prix de revient. En effet, les dépenses minéralurgiques ont un poids croissant dans la détermination des teneurs limites exploitables au fur et à mesure qu'augmente la dimension des exploitations.

Les coûts d'extraction des minerais

exploités à grande échelle ont été diminués dans des proportions spectaculaires par l'utilisation de très puissants engins de carrière et, en ce qui concerne les exploitations souterraines, par des méthodes d'abattage en grande masse. Par contre les coûts de la minéralurgie qui sont déjà à un niveau très bas dans les exploitations moyennes, sont beaucoup moins sensibles à l'augmentation des capacités, de telle sorte que dans le prix de revient total d'exploitation, le coût du traitement minéralurgique prend une importance relative plus grande comme le montre le tableau I.

A côté de cette recherche de diminution des prix de revient, s'ajouteront celles relatives aux investissements dont l'incidence des coûts croît avec le taux d'intérêt de l'argent et la plus grande difficulté à se procurer les capitaux nécessaires.

Les procédés eux-mêmes devront être adaptés aux traitements de minerais plus complexes et de structure plus fine pour

beaucoup desquels on ne dispose pas actuellement de méthode satisfaisante. C'est le cas par exemple des minerais sulfurés complexes de plomb, zinc, cuivre des gisements du Sud de l'Espagne et du Portugal pour lesquels des traitements mixtes par flottation et hydrométallurgie sont étudiés dans plusieurs laboratoires.
Le traitement des nodules des fonds marins fait actuellement l'objet de nombreuses recherches. Leur structure est d'une finesse telle que seuls des modes de traitement chimiques peuvent être envisagés, ceux-ci seront différents suivant qu'à côté du cuivre, du nickel et du cobalt, on cherche à récupérer ou non le manganèse.

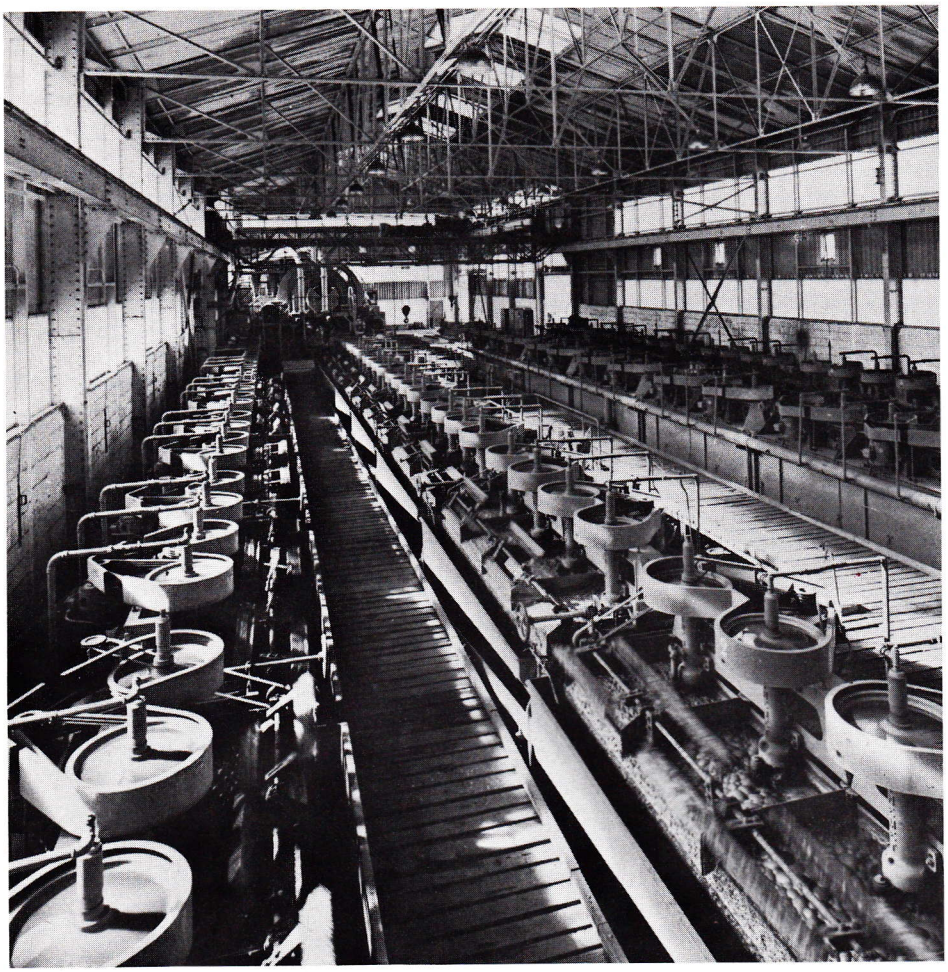
### Hydrométallurgie

Les procédés hydrométallurgiques peuvent s'appliquer au traitement des minerais tout-venants, mais leur développement a été limité par la difficulté de solubiliser sélectivement les éléments de valeur sans attaquer les gangues et les minéraux accessoires.
Les minerais d'or sont traités par cyanuration depuis le début du siècle. Grâce à la sélectivité des solutions de cyanure, c'est un cas idéal de traitement hydrométallurgique qui a permis de mettre parfaitement au point une technologie qui a servi depuis de modèle.
Des minerais oxydés de nickel et surtout des minerais d'uranium sont traités par des procédés hydrométallurgiques depuis plus de 25 ans avec un tel succès qu'ils ont suscité dans le monde entier un véritable engouement. En effet, les extractions par solvants, l'utilisation des résines échangeuses d'ions ajoutent aux précipitations chimiques plus classiques des possibilités séduisantes pour la récupération sélective des métaux à partir de solutions complexes.
Il faut donc s'attendre au développement de ces techniques chaque fois que la structure minéralogique des minerais ne permet pas d'envisager l'utilisation des méthodes de concentration traditionnelles telles que flottation, gravimétrie, ou séparation magnétique dont les prix de revient sont plus faibles.
La dissolution in situ des éléments de valeur du minerai à basses teneurs après leur fragmentation, à l'explosif si nécessaire, est déjà utilisée dans des mines de cuivre et des mines d'uranium. On a expérimenté aux U.S.A. la lixiviation de masses fragmentées par explosion nucléaire.
Les procédés hydrométallurgiques peuvent réaliser l'ensemble des étapes qui conduisent du minerai tout-venant au produit pur, c'est-à-dire, pour les minerais métalliques, les opérations de concentration, de réduction et de raffinage. Ils permettent dans certains cas de faire face plus élégamment aux impératifs de la lutte contre les pollutions, mais leurs effluents liquides peuvent cependant poser des problèmes.
D'un point de vue général, d'importants progrès restent à faire dans le domaine des séparations liquide-solide et des extractions dans les pulpes de minerais finement broyés.
D'ici la fin du siècle, l'hydrométallurgie étendra son domaine aux minerais métalliques complexes sulfurés et oxydés de cuivre, plomb, zinc, nickel, cobalt... et assurera en même temps la récupération des éléments mineurs tels que cadmium et germanium.

### Vapométallurgie

De même que pour l'hydrométallurgie, les procédés vapométallurgiques, qui vaporisent sélectivement les éléments de valeurs, peuvent, dans certains cas, trouver une forme d'application au traitement de minerais tout-venants.
Des méthodes de chloruration sélective peuvent par exemple être envisagées pour les métaux dont les chlorures sont

*Mine au XIX^e siècle.*
*Cheval tirant un train de berlines.*



*Traitement d'un minerai plombo-zincifère par flottation (Laverie de Largentière - France).*

volatils. Le procédé dit de « Ségrégation » qui consiste à chauffer à 800 ou 900 °C un minerai oxydé de cuivre en présence de chlorure de sodium et de charbon en poudre en est un exemple.
L'International Nickel Co a proposé de traiter les minerais oxydés de nickel ayant subi une préréduction sélective du nickel, par l'oxyde de carbone sous une pression de quelques atmosphères, de façon à en extraire le nickel sous forme de nickel carbonyle. Le fer carbonyle qui peut être présent en petite quantité est séparé par distillation et la décomposition du nickel carbonyle donne directement un métal particulièrement pur.

## Les techniques traditionnelles

L'importance relative plus grande des coûts de la minéralurgie dans les grandes exploitations a donné une impulsion nouvelle aux études fondamentales et aux recherches d'application dont il y a tout lieu de penser qu'elles continueront à se développer, car c'est de leurs résultats que dépendra principalement la possibilité de mettre en exploitation les gisements à très basses teneurs qui constitueront bientôt nos principales ressources.
La flottation continuera d'être le procédé de choix chaque fois qu'il sera possible par broyage de libérer les espèces minérales de valeur. Les progrès dans la connaissance de la chimie des surfaces permettront de mieux maîtriser les réactions et la détermination plus précise des conditions de flottation sélective permettra d'étendre le domaine de la flottation du côté des très fines granulométries, inférieures à 5 microns.
La fabrication de réactifs « sur mesure » pour la flottation des minéraux se développera, elle a été jusqu'à présent parfois freinée par l'étroitesse du marché que représente l'approvisionnement d'une exploitation car les consommations de réactifs, de l'ordre de la centaine de grammes par tonne de minerai traité, sont faibles. Mais l'augmentation de la taille des exploitations et l'importance de l'enjeu que représente la perspective de mise en exploitation de grandes réserves de minerai à basses teneurs justifiera ces développements.
Le triage des grains très fins sera l'un des objectifs majeurs des recherches des prochaines décennies. Les méthodes de floculation sélective qui n'ont jusqu'à présent donné que des résultats très modestes font appel aux mêmes connaissances de base que la flottation et progresseront certainement, de même que des procédés voisins tel que celui des minéraux porteurs sur lesquels s'agglomèrent les particules et qui sont ensuite séparés par les procédés classiques.
Les procédés de séparation gravimétriques, magnétiques et électriques sont actuellement limités à la séparation des grains de dimension supérieure à 20 ou 30 microns, les forces de résistance au déplacement des grains plus fins dans l'air, et à fortiori dans l'eau, devenant excessives au regard des forces agissant pour différencier les minéraux. Les recherches visant à franchir ce seuil de dimension dans des conditions économiques se poursuivront : utilisation de champs d'accélération beaucoup plus grande que celle de la pesanteur, séparations magnétiques dans le vide... Elles conduiront certainement à des possibilités industrielles mais elles supposent des développements technologiques délicats.
Dans les problèmes du futur, reviennent comme un leitmotiv ceux relatifs aux minerais à structures très fines pour lesquelles la libération n'est obtenue qu'au dessous de 10 à 30 microns. En supposant disponibles les procédés de triage de ces grains fins, encore faut-il pouvoir broyer ces minerais aux dimensions de libération dans des conditions économiques.
Dans une première phase, les progrès viendront surtout des appareils de classification qui ont pour mission de sortir des circuits de broyage les grains ayant atteint la finesse requise ; on peut espérer de ce côté un gain de l'ordre de 25 % sur la capacité du broyage des circuits fonctionnant avec des broyeurs à boulets.
Certains procédés comme les broyages cryogéniques trouveront des domaines d'application, mais très limités parce que les consommations d'énergie sont très élevées et leur coût apparaît prohibitif pour la fragmentation des minerais à basse teneur.
Toutes les recherches visant les économies d'énergie vont trouver une justification supplémentaire dans le contexte actuel et les machines des usines minéralurgiques feront de plus en plus appel aux matériaux résistant à l'usure et à la corrosion dès que ceux-ci seront commercialement disponibles.

## Contrôle et automatisation

Si la minéralurgie apparaît notoirement en retard dans ces domaines par rapport

à d'autres industries, c'est qu'on commence seulement à disposer de capteurs suffisamment fiables. Il faut, en effet, des appareils résistant à l'abrasion très sévère et aux corrosions que provoquent les pulpes de minerais sur lesquelles les mesures sont effectuées.

Il y a là un domaine majeur qui permettra la poursuite des progrès de la minéralurgie ; la prochaine décennie doit pouvoir apporter des solutions satisfaisantes à la plupart de ces problèmes.

Lorsqu'on pourra disposer de capteurs fiables, il n'y aura aucune difficulté pour assurer le dépouillement des données par ordinateur et le passage à la commande automatique des circuits, en utilisant des modèles dont la mise au point est déjà bien avancée et qui ont pu être testés avec succès dans quelques-unes des laveries où ces recherches se poursuivent. Il faut toutefois ne pas perdre de vue les conditions particulières d'exploitation de ces ateliers isolés que sont la plupart des laveries dans lesquelles il est difficile de maintenir des équipes de spécialistes électroniciens et informaticiens de haute qualification. Il faudra donc d'une part que les techniques soient parfaitement au point avant d'être proposées à l'application en temps réel et d'autre part que des dispositions soient prises pour assurer sur place la formation des spécialistes indispensables.

## Conservation des richesses minières

Au moment où le mot pénurie apparaît tous les jours sur les pages de nos journaux, le souci de récupérer la totalité des éléments de valeur des minerais paraît bien être un devoir essentiel du mineur et du minéralurgiste ; et les pertes des exploitations actuelles semblent inexcusables.

En fait les choses ne sont pas si simples et si la conservation et le bon usage des richesses minérales doit effectivement être une préoccupation majeure, il faut l'envisager d'une façon moins simpliste.

Une constatation s'impose tout d'abord : Toute exploitation minière, toute usine de traitement minéralurgique laissent des résidus qui contiennent encore en petite quantité des produits de valeur, car aucune opération industrielle ne se fait avec un rendement de 100 % et la récupération des éléments de valeurs au-delà d'une certaine limite serait prohibitive. Une saine gestion du patrimoine minéral exige avant tout, dans l'exploitation des gisements, de stocker les rejets des mines et des laveries, de telle sorte qu'ils puissent être aisément repris et retraités quand les techniques auront suffisamment progressé pour permettre la récupération des éléments provisoirement abandonnés.

Ces reprises successives des rejets des anciennes exploitations (les haldes) ont été pratiquées depuis longtemps.

Ainsi la plupart des gisements de zinc du bassin méditerranéen ont déjà été exploités trois fois.

Les rejets actuels qui contiennent encore parfois plusieurs pourcentages de zinc oxydé extrêmement fin, non récupérable par flottation, seront vraisemblablement traités par dissolution chimique lorsque les conditions économiques le justifieront. Les procédés sont connus mais d'un prix de revient trop élevé pour le moment.

Dans une exploitation actuelle bien conduite, il ne doit pas y avoir de gâchis mais, dans l'avenir, les exigences de plus en plus sévères de la protection de l'environnement auront comme conséquence accessoire importante d'imposer des méthodes rigoureuses de stockage des résidus d'exploitation et une gestion scrupuleuse de ces rejets qui en facilitera grandement la reprise et les retraitements ultérieurs.

R.J.T.

*Mine d'Atalaya,*
*Rio Tinto Zinc, Espagne.*
*Diamètre de la carrière : 1,3 km.*