



# La biolixiviation des minerais sulfurés

Dominique Morin

## ► To cite this version:

Dominique Morin. La biolixiviation des minerais sulfurés. Géosciences, 2010, 11, p. 82-89. hal-00520887

**HAL Id: hal-00520887**

**<https://brgm.hal.science/hal-00520887>**

Submitted on 24 Sep 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'oxydation des minerais sulfurés par l'oxygène de l'air produit de l'énergie au cours d'une réaction naturellement accélérée par des micro-organismes capables de se développer dans des conditions hostiles à toute autre forme de vie. La maîtrise de cette catalyse biologique a permis de concevoir des procédés industriels d'extraction de métaux comme le cuivre, l'or, le cobalt et le nickel. Ces procédés complètent les moyens actuels d'exploitation des ressources minérales primaires et ouvrent des perspectives sur le long terme dont l'économie mondiale aura besoin pour satisfaire une demande croissante.



## La biolixiviation des minerais sulfurés

82

BIOLIXIVIATION



**Dominique H.-R. Morin**

RESPONSABLE DE L'UNITÉ ÉCOTECHNOLOGIES  
DU BRGM, INGÉNIEUR SPÉCIALISÉ EN  
DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS BIOTECHNOLOGIQUES  
POUR LA VALORISATION DES RESSOURCES MINÉRALES  
ET LES APPLICATIONS ENVIRONNEMENTALES  
[d.morin@brgm.fr](mailto:d.morin@brgm.fr)

**Vue d'un des bioréacteurs (1 300 m<sup>3</sup>) de l'usine de traitement de minerai KCC Ltd (Kasese Cobalt Company Limited), Kasese, Ouganda. Le procédé de biolixiviation mis au point par le BRGM permet la récupération de cobalt à l'échelle industrielle.**

*A view of one of the bioreactors (1300 m<sup>3</sup>) at the KCC (Kasese Cobalt Company Limited) ore processing plant in Kasese, Uganda. The bioleaching method developed by BRGM enables cobalt to be recovered at industrial scale.*

© D. Morin, BRGM.

Les eaux d'infiltration des dépôts géologiques sulfurés et les exhaures des mines de ces gisements contiennent des métaux qui sont dissous sous l'effet de l'activation biologique naturelle des organismes microbiens. La capacité de ces micro-organismes à maîtriser le processus de dégradation de minéraux sulfurés est à l'origine du concept de procédé de biolixiviation. Au-delà du phénomène naturel, la biolixiviation est devenue un mode de production de métaux de valeur dont les premières installations industrielles ont vu le jour il y a une cinquantaine d'années. La transformation oxydo-réductrice des métaux et de leurs composés sulfurés est leur source d'énergie, et le CO<sub>2</sub> de l'air est leur source de carbone permettant de satisfaire leurs besoins métaboliques et de reproduction. Ce qui fait de ces micro-organismes l'un des premiers maillons de la chaîne de la vie.

Les deux principaux éléments chimiques minéraux dont les changements d'état d'oxydation servent à la croissance de ces

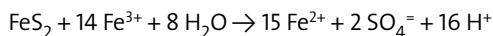
“  
Au-delà du phénomène naturel, la biolixiviation est devenue un mode de production de métaux de valeur.”

micro-organismes sont le soufre et le fer. Or ces deux éléments sont les constituants majeurs des gisements de minerais sulfurés qui recèlent une fraction importante de certains métaux de grande valeur économique. Le cuivre, l'or, l'uranium, le nickel et le cobalt sont les métaux dont une part de la production mondiale est le fait d'installations industrielles utilisant la biolixiviation.

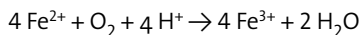
## Les processus de biolixiviation pour les minéraux d'intérêt économique

### Biolixiviation de la pyrite

En milieu naturel, le minéral sulfuré dont la dégradation par biolixiviation la plus fréquemment observée est la pyrite. De formule chimique  $\text{FeS}_2$ , la pyrite est le sulfure métallique le plus abondant sur Terre, exploité depuis des siècles pour la fabrication d'acide sulfurique. Au contact de l'air, la réaction d'oxydation de la pyrite obéit à l'équation suivante :



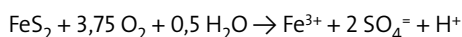
Le rôle de l'activité microbienne dans le processus de biolixiviation est en particulier d'accélérer l'oxydation du fer ferreux en ferrique et donc de régénérer ce puissant oxydant de la pyrite, comme indiqué ci-dessous :



On dit couramment que l'effet de catalyse biologique a le pouvoir de multiplier par un facteur de près d'un million la vitesse de cette oxydation.

Un second mécanisme constitutif de la biolixiviation est l'oxydation du soufre élémentaire ou de formes intermédiaires d'oxydes de soufre par des micro-organismes sulfo-oxydants.

Globalement, la réaction générale d'oxydation de la pyrite au contact de l'oxygène de l'air s'écrit alors ainsi :



La matrice cristalline de la pyrite peut contenir ou être associée à des métaux comme l'or, le cobalt, le nickel ou le cuivre qu'il est économiquement intéressant d'extraire par un traitement par biolixiviation. Ces métaux peuvent être présents sous forme de composés sulfurés ou sous forme élémentaire dans le cas de l'or, ou encore inclus dans le réseau cristallin de la pyrite qu'il faudra donc détruire, au moins partiellement, pour récupérer le métal de valeur.

Il arrive par exemple que la pyrite piège de l'or au point qu'il est impossible, même après un broyage très poussé, de libérer une fraction significative du métal précieux des minerais qui ont cette caractéristique. Les techniques minéralurgiques conventionnelles basées sur les différences de densité et de taille des minéraux ou de solubilité dans des solutions aqueuses complexantes (cyanure) restent alors impuissantes.

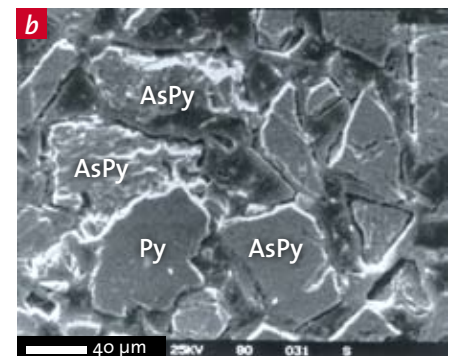
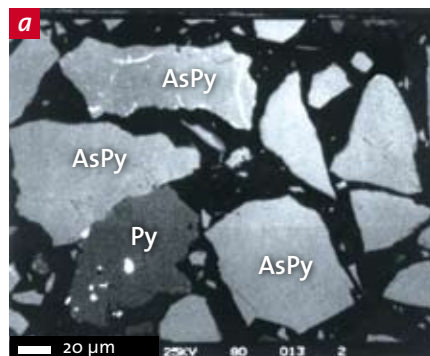
Très fréquemment ce type de matrice sulfurée contient aussi de l'arsenic, le plus souvent sous forme d'arsénopyrite ( $\text{FeAsS}$ ), et il est remarquable d'observer que la pyrite se montre plus réfractaire à la dégradation par biolixiviation que l'arsénopyrite. La différence de susceptibilité à la dégradation est encore plus prononcée lorsque pyrite et arsénopyrite se trouvent en contact, comme le résultat d'un effet de pile ou galvanique (figure 1) où la pyrite joue le rôle d'une cathode, tandis que l'arsénopyrite joue celui d'une anode. Comme illustré à la figure 2, l'oxydation par biolixiviation des sulfures conduit à la libération de l'or qui reste inaltéré mais devient physiquement accessible aux traitements habituels.

**Fig. 1 : Photographies en microscopie électronique à balayage de grains de pyrite (gris foncé, Py) et d'arsénopyrite (gris clair, AsPy) enchâssés dans la résine d'une section polie.**  
a) Avant biolixiviation, en électrons rétrodiffusés pour distinguer les deux sulfures.  
b) Après un traitement par biolixiviation partiel, en électrons secondaires pour montrer les figures de corrosion des sulfures.

Fig. 1: Photographs of pyrite (dark grey, Py) and arsenopyrite (light grey, AsPy) encased in the resin of a polished section taken with a scanning electron microscope.

a) Before bioleaching, using backscattered electrons to distinguish between the two sulfides.  
b) After partial bioleaching processing using secondary electrons to reveal the corrosion figures on the sulfides.

© D. Morin.



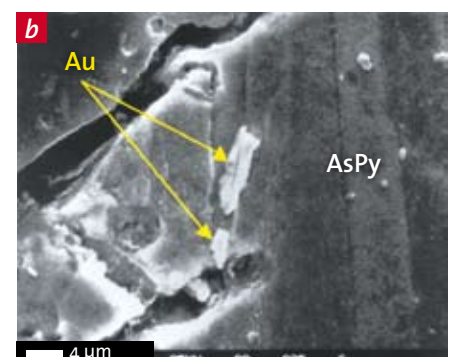
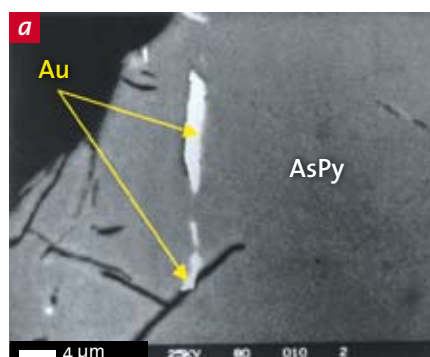
**Fig. 2 : Libération de grains d'or piégés dans de l'arsénopyrite par biolixiviation ménagée.** Photographies prises au microscope électronique à balayage.

a) Avant biolixiviation, en électrons rétrodiffusés.  
b) Après un traitement par biolixiviation partiel, en électrons secondaires pour montrer la corrosion de l'arsénopyrite à l'endroit des fractures du minéral sulfuré.

Fig. 2: Release of grains of gold trapped in arsenopyrite using mitigated bioleaching. Photographs taken with a scanning electron microscope.

a) Before bioleaching, using backscattered electrons.  
b) After partial bioleaching processing using secondary electrons to reveal corrosion of the arsenopyrite along the fractures of the sulfide mineral.

© D. Morin.





*Des micro-organismes thermophiles (60 à 80 °C) ont la faculté d'exploiter l'oxydation de la chalcopryrite. La découverte de cette capacité a renouvelé l'intérêt de la biolixiviation.*

84

Dans le cas d'autres métaux piégés par la pyrite, comme le cobalt, le traitement par biolixiviation conduit à leur solubilisation sous forme de sels de sulfate, et il est possible de les récupérer sélectivement à partir de la solution aqueuse produite par neutralisation à la chaux, précipitation chimique, extraction par solvant ou résine, etc.

#### **Les minerais de cuivre**

Les gisements de cuivre résultent d'activités géothermales qui ont généré principalement des sulfures dont le minéral majoritaire est la chalcopryrite ( $\text{CuFeS}_2$ ), porteur de cuivre dit primaire.

On extrait des gisements un minerai contenant à peine 0,5 % à quelques % de cuivre. Il subit d'abord un traitement de concentration des porteurs sulfurés de ce métal. Le concentré sulfuré produit est habituellement traité par voie pyrométallurgique pour en extraire le cuivre à l'état élémentaire. La partie superficielle des dépôts minéralisés est souvent constituée de minéraux oxydés ainsi que de minéraux sulfurés de cuivre dits secondaires dont les principaux représentants sont la chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) et la covellite ( $\text{CuS}$ ).

De longue date on sait dissoudre le cuivre des minerais oxydés par attaque à l'acide sulfurique. Depuis très longtemps aussi, on a su appliquer, comme à Rio Tinto en Espagne, un traitement par biolixiviation aux minerais des minéraux secondaires de cuivre, sans avoir connaissance du processus qui en est à l'origine. En fait, ces minéraux se dissolvent facilement au cours d'une attaque oxydante au fer ferrique en milieu acide qui, dans le procédé de biolixiviation, comme on l'a vu pour la pyrite, est régénéré par l'oxydation du fer ferreux produite par une activité microbienne fer-oxydante.

La chalcopryrite est beaucoup plus réfractaire à la dégradation chimique d'une manière générale et à la biolixiviation en particulier. Pendant très longtemps on a observé que dans des conditions oxydantes et à température modérée (30 à 40 °C) il se produit une passivation de la surface du sulfure, et récemment il

aurait été clairement identifié que c'est une couche de jarosite, hydroxy-sulfate de fer ferrique, qui inhibe la poursuite de son attaque [Parker *et al.* (2003)]. La jarosite étant d'autant plus présente que la concentration en fer ferrique est élevée, c'est à un potentiel électrochimique modéré que l'on parvient à oxyder la totalité de la chalcopryrite. Des micro-organismes thermophiles (60 à 80 °C) ont la faculté d'exploiter l'oxydation de la chalcopryrite dans ces conditions [Vilcáez *et al.* (2008)] et la découverte de cette capacité a renouvelé l'intérêt de la biolixiviation qui peut s'étendre à plus de ressources qu'il n'était initialement imaginé.

#### **Les minerais de nickel**

La majorité des réserves de minerais de nickel est sous forme de sulfures, suivant les estimations d'Eramet (2006). La pentlandite ( $\text{FeNi}_9\text{S}_8$ , généralement associée à la pyrrhotite ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), est le minéral sulfuré qui a la plus grande valeur économique. La forte demande en nickel de ces dernières années, due à l'accroissement très significatif de la production d'acier de la Chine, a conduit à une recrudescence d'intérêt pour les minerais à faible teneur de ce type.

Une particularité des minerais de pyrrhotite est leur grande réactivité à l'oxygène de l'air et leur forte demande en acide lors de l'oxydation. En présence d'eau et d'air, ils produisent naturellement du fer ferreux et du soufre élémentaire qui sont autant de combustibles pour une activité microbienne dont le développement permet de libérer le nickel et bien d'autres métaux associés comme le cuivre, le cobalt, le zinc et les platinoïdes.

#### **Les minerais des autres métaux**

Les sulfures de zinc sont des minéraux facilement dégradables qui ont fait l'objet de beaucoup d'études à des échelles allant jusqu'à la démonstration. Un facteur limitant à la mise en application est souvent la présence d'argent qu'il n'est pas facile de récupérer économiquement. Cela est aussi vrai pour le plomb. Pour les minerais d'uranium, le rôle de l'activité microbologique est de permettre la régénération du fer ferrique pour oxyder l'uranium d'une forme insoluble ( $\text{UO}_2$ ) à une forme soluble ( $\text{UO}_2^{2+}$ ).

### **Les systèmes microbiens de la biolixiviation**

Au-delà de leur capacité à extraire de l'énergie à partir des oxydations du fer ou du soufre ou des deux, les micro-organismes employés, auxquels on attribue

le qualitatif d'extrémophile du fait de leur caractère très acidophile et tolérant aux métaux (voir article de B. Johnson dans ce numéro), sont classés suivant, entre autres particularités, leurs températures optimales de croissance. Ils sont mésophiles lorsque celles-ci vont de l'ambiante à 40 °C, modérément thermophiles de 45 à 55 °C et extrêmes thermophiles de 65 à 80 °C. Les populations ne sont jamais constituées d'un seul micro-organisme mais de consortia de bactéries et d'archées, ces dernières étant en plus grande proportion lorsque la température s'élève. L'arbre très simplifié en figure 3 recense les principales espèces rencontrées en biolixiviation. Une propriété commune est leur grande tolérance aux métaux à forte concentration en solution, c'est-à-dire jusqu'à des dizaines de grammes par litre, à des niveaux où toute autre forme de vie disparaît. Ces micro-organismes ont un caractère acidophile marqué et sont généralement actifs à des pH inférieurs à 2,5, mais tolèrent fréquemment des valeurs bien inférieures à 1.

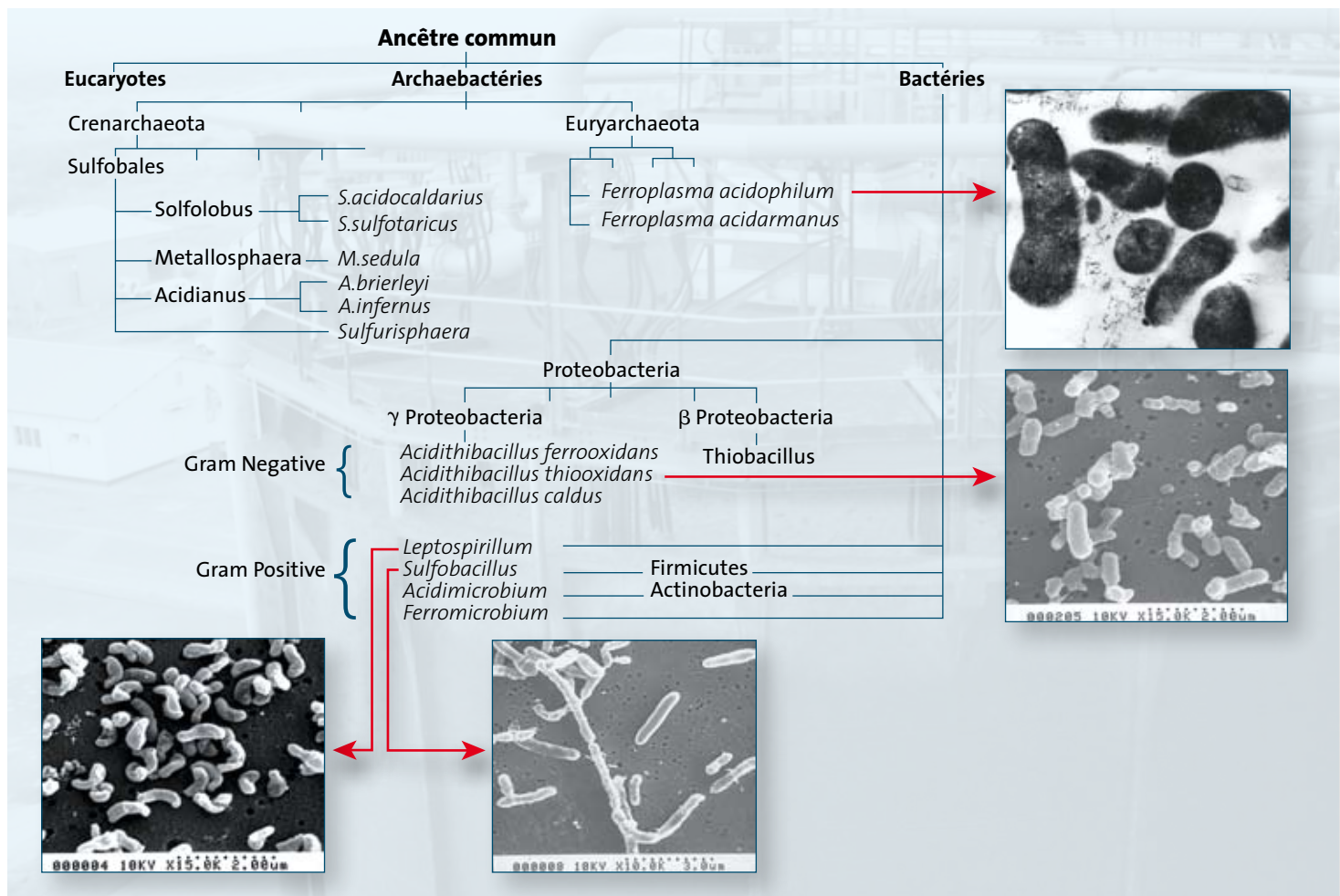
“ Les micro-organismes employés, qualifiés d'extrémophiles, sont classés suivant, entre autres particularités, leurs températures optimales de croissance. [...] Une propriété commune est leur grande tolérance aux métaux à forte concentration en solution. ”

Il a été montré que le mécanisme de dégradation des sulfures que ces micro-organismes activent est pour l'essentiel indirect. C'est-à-dire qu'ils oxydent le fer ferreux en fer ferrique qui, lorsqu'ils sont attachés à la surface des sulfures, est complexé par des substances polymériques extracellulaires pour attaquer les sulfures dans un micro-environnement favorable à la dégradation des minéraux [Sand et Gehrke (2006)].

**Fig. 3 : Liste des principaux micro-organismes de la biolixiviation identifiés, et photographies montrant quelques-uns de ceux-ci.**

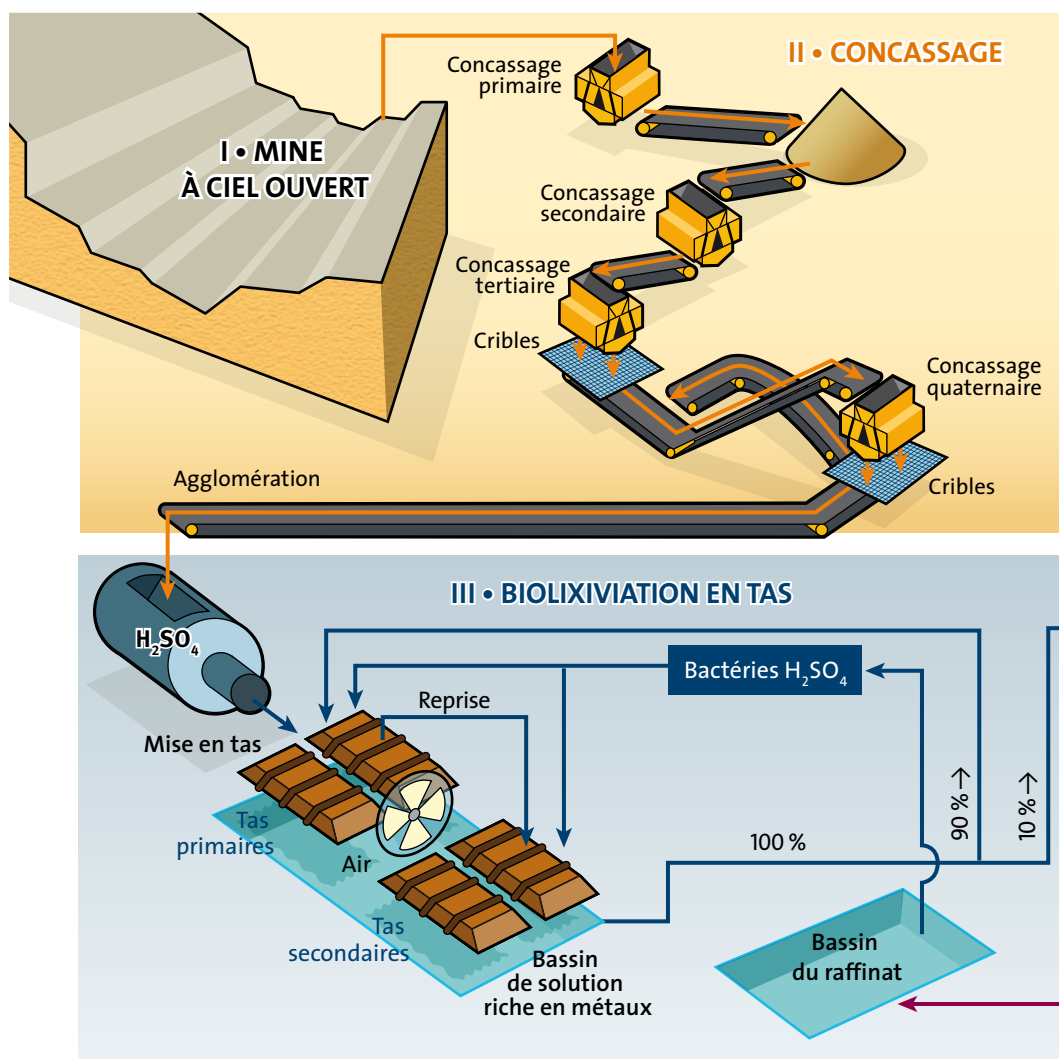
Fig. 3: A list of the principal microorganisms identified in bioleaching together with photographs depicting several of them.

© B. Johnson, M. Dopson.



## Les technologies de biolixiviation

Il y a deux grandes familles de procédés. L'une des voies, dite **statique**, consiste à faire percoler des solutions acides à travers le minerai, que ce soit *in situ*, disposé dans des vallons aux parois imperméables après une fragmentation réduite (procédé appliqué aux déchets miniers en particulier) ou en tas sur des aires étanches réutilisables ou non pour ce qui concerne les minerais à faible teneur. Un exemple d'installation de biolixiviation en tas récemment mise en opération est celui de Talvivaara en Finlande. Démarrée fin 2008, elle extrait du nickel, du cobalt, du cuivre et du zinc d'un minerai pauvre qui en contient les teneurs respectives suivantes : 0,27, 0,02, 0,014 et 0,54 %. Le schéma (figure 4) montre les quatre étapes du traitement.



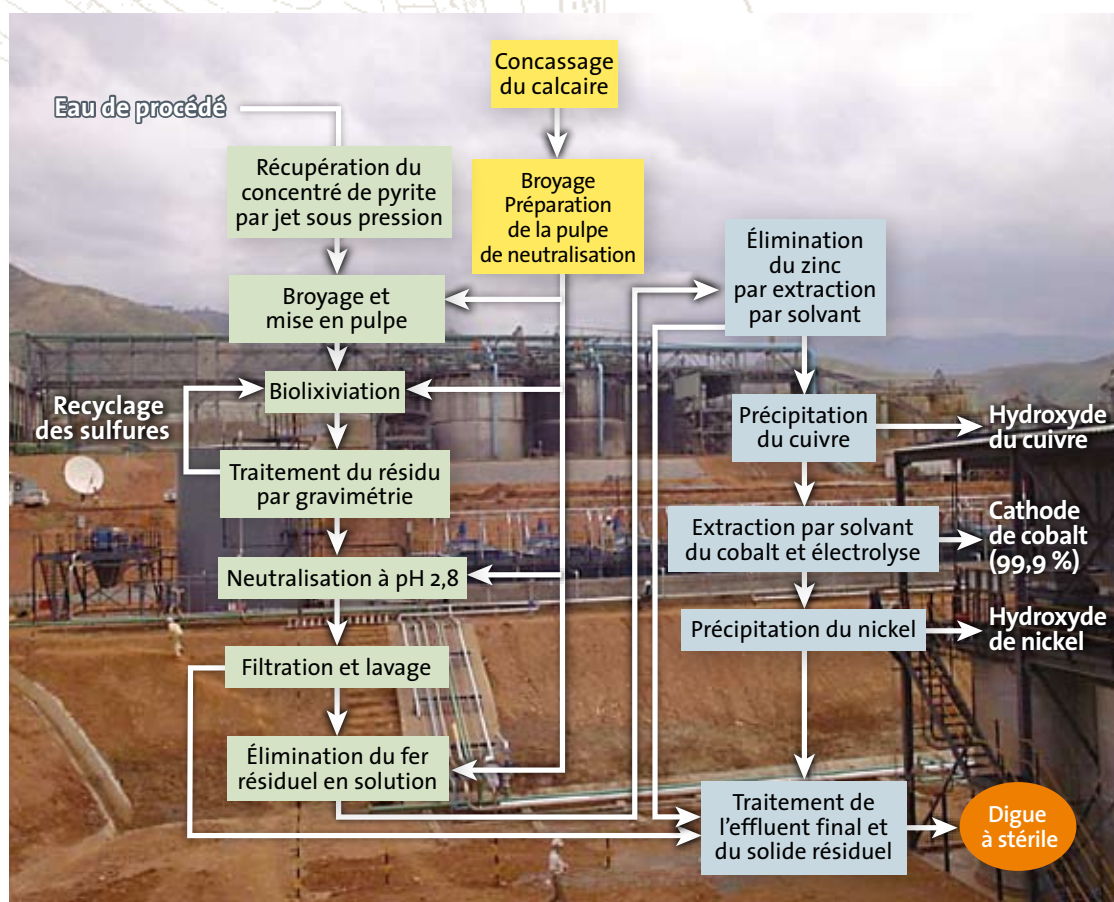
**Fig. 4 : Photo et schéma simplifié du traitement du minerai de nickel de Talvivaara (Finlande) exploité par la société TVK.**

© D'après le site internet TVK : [http://www.talvivaara.com/operations/Talvivaara\\_operations/Processing](http://www.talvivaara.com/operations/Talvivaara_operations/Processing).

Fig. 4: Photo and simplified diagram illustrating how nickel ore is processed at the Talvivaara plant operated by the company TVK in Finland.

© From the TVK web site: [http://www.talvivaara.com/operations/Talvivaara\\_operations/Processing](http://www.talvivaara.com/operations/Talvivaara_operations/Processing).





**Fig. 5 : Schéma général simplifié de l'installation de production de cobalt de la Kasese Cobalt Company Ltd. (Ouganda).**

*Fig. 5: A simplified diagram of the cobalt production plant at Kasese Cobalt Company Ltd. (Uganda).*

Après extraction d'une mine à ciel ouvert, concassage et agglomération, une opération qui vise à améliorer les caractéristiques de percolation, le minerai est mis en tas et le traitement par arrosage a lieu en deux temps. La reprise du premier tas a pour objectif de permettre l'attaque plus poussée des zones du minerai qui n'auraient pas été suffisamment mises en contact avec les solutions de percolation, comme les pentes par exemple. La solution mère de biolixiviation est ensuite traitée à l'aide de sulfure d'hydrogène pour produire successivement des précipités de chacun des métaux à récupérer (cuivre, zinc, puis nickel et cobalt). La réaction d'oxydation de la pyrrhotite contenue dans ce minerai étant très exothermique, la température à l'intérieur du tas peut s'élever considérablement jusqu'à près de 80 °C, et même dans les conditions climatiques rigoureuses de l'hiver finlandais, l'efficacité du traitement se maintient. Le nickel et le zinc sont les métaux les plus facilement extraits à 85 et 80 % respectivement en cinq années de traitement, et le cuivre et le cobalt les plus réfractaires avec un taux d'extraction de 50 % pour la même période. L'installation de Talvivaara devrait avoir les plus faibles coûts opératoires de production de nickel à partir de ressources primaires pour une production annuelle de 30 000 tonnes de métal.

**L'autre voie d'application de la biolixiviation, dite dynamique,** commence par un broyage fin du minerai, la concentration des sulfures porteurs du métal d'intérêt et ensuite le traitement par biolixiviation proprement dit, dans une série de cuves, du concentré sulfuré mis en pulpe dans une solution aqueuse. Chacune des cuves est agitée par un système mécanique et oxygénée par injection d'air.

Une unité de ce type implantée en Ouganda et mise au point par le BRGM traite un concentré de pyrite cobaltifère qui est un sous-produit d'une installation minière qui a produit un concentré de cuivre pendant une vingtaine d'années avant son arrêt d'exploitation en 1986 (figure 5).

Le cobalt, contenu à une teneur de 1,37 % dans le concentré sulfuré constitué de 80 % de pyrite, est dissous au cours de la biolixiviation de la pyrite sous forme de  $\text{Co}^{++}$  avec le même rendement que celui de la dégradation du sulfure. Le nickel et le cuivre, aussi présents dans le concentré à des teneurs respectives de 0,12 et 0,14 %, sont mis en solution à un moindre degré.

La solution aqueuse issue du biotraitement est débarrassée du fer dissous par neutralisation ménagée à

## LA BIOLIXIVIATION DES MINÉRAIS SULFURÉS

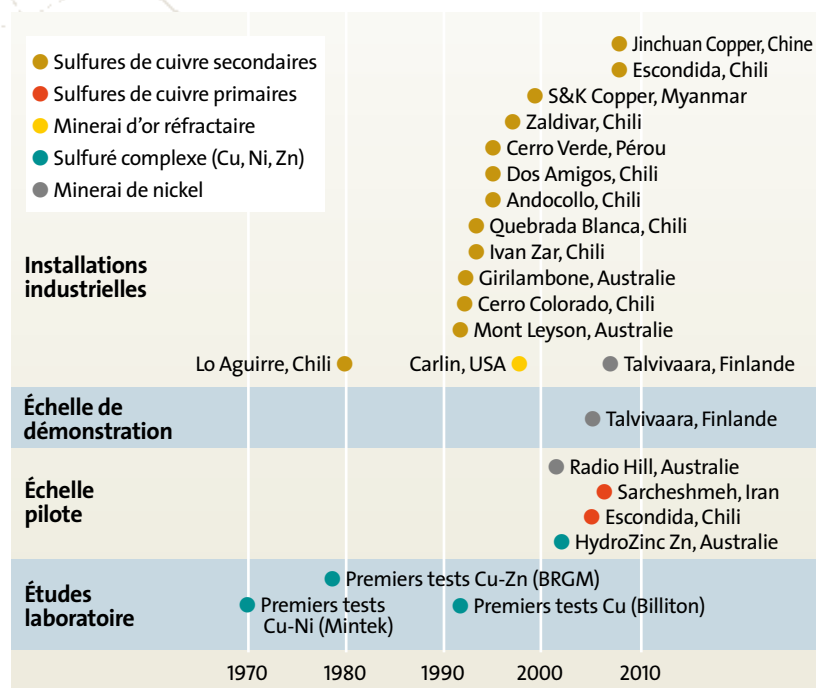
l'aide de calcaire en deux étapes. La première jusqu'à un pH d'environ 2,8 permet d'éliminer plus de 95 % du fer et de recycler le filtrat en biolixiviation pour y concentrer le cobalt qui n'est pas affecté par la neutralisation. La seconde neutralisation à un pH supérieur à 3,5 éradique totalement le fer avant extraction du zinc par solvant organique (D2EHPA, diéthyl phénylamine) puis celle du cuivre par neutralisation à pH 7. Le cobalt est récupéré par extraction par solvant (acide phosphinique) et, après élution, le métal pur à plus de 99,9 % est obtenu par électrolyse. Pour finir, le nickel est extrait par neutralisation à pH élevé. La production annuelle de cobalt est de l'ordre de 800 tonnes par an. Il s'agit de la seule installation industrielle en cuve agitée produisant un métal autre que de l'or. Elle fonctionne depuis une dizaine d'années.

### Économie et développement durable

Comme on peut le voir aux figures 6 et 7, après des études à l'échelle pilote puis de démonstration, **des installations industrielles de biolixiviation en tas et en cuves agitées** se sont implantées régulièrement au long des vingt dernières années ; les substances traitées s'étendant des minerais de cuivre secondaires aux minerais de cuivre primaires et au nickel en voie statique, de l'or au cobalt, au zinc et au cuivre en voie dynamique.

C'est au Chili que l'on a vu la mise en place d'opérations de taille considérable pour augmenter la production de cuivre de ce pays qui en est l'exportateur principal. Par exemple, à Escondida, dans le désert d'Atacama, majoritairement sous contrôle de la compagnie BHP Billiton, l'installation de biolixiviation en tas de minerai pauvre fait 5 kilomètres de long, 2 de large et, à son achèvement, plus de 100 mètres de haut. Il est extrait près d'un million de tonnes de minerai chaque jour des deux mines à ciel ouvert exploitées, et le tas final représentera une masse de plus d'un milliard de tonnes de minerai. La production nominale de cette unité est de 180 000 tonnes de cuivre électrolytique par an. Les principaux opérateurs de la biolixiviation en tas au Chili sont Codelco, BHP Billiton et Barrick Gold.

L'Afrique du Sud a vu naître le concept de biolixiviation en cuve agitée sur des minerais d'or réfractaire (Fairview), et celle-ci est maintenant en usage au Ghana (Ashanti), en Australie, en Ouzbékistan, au Kazakhstan et en Chine. C'est principalement la société Gold Fields qui commercialise ce procédé sous la forme d'une participation à son exploitation dans

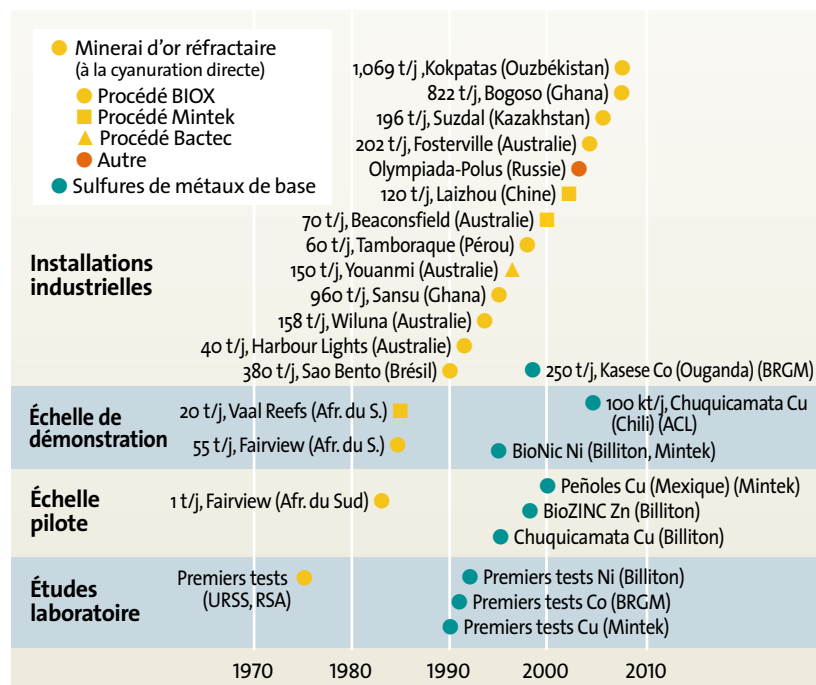


▲ **Fig. 6 : Liste non-exhaustive des installations de biolixiviation en tas dans le monde.**

D'après Clark et al. (2005).

Fig. 6: An inexhaustive list of bioheap leaching plants in the world.

From Clark et al. (2005).



▲ **Fig. 7 : Liste non-exhaustive des installations de biolixiviation en cuve agitée dans le monde.**

D'après Clark et al. (2005).

Fig. 7: An inexhaustive list of bioleaching plants using stirred tanks in the world.

From Clark et al. (2005).





## Bioleaching of Sulfide Ores

*Bioleaching, or the recovery of metal through implementation of a microbiological process, has become a commercial reality, mobilizing robust procedures that can be adapted to an increasingly wide variety of ores (copper, gold, cobalt, nickel, uranium...).*

*The concept is based on a certain type of interaction between microorganisms and sulfide minerals. The microorganisms depend on the oxidation of sulfides, which extracts the metals contained in these types of matrix. They derive the energy they need to grow and are highly effective at decomposing these minerals.*

*Two techniques of processing by bioleaching are applied at industrial scale. The first consists in forming heaps of summarily crushed ore, then allowing an aqueous solution to percolate through them which inoculates the mineral surfaces and becomes enriched in metal which can be recovered. The second entails milling the ore, extracting the sulfide fraction, and attacking the sulfide concentrate by bioleaching in stirred tanks. Bioheapleaching is mainly used for sulfide copper ores, supergene ores and minerals such as covellite and chalcocite, but certain innovations open up the perspective of attacking primary ores, and accordingly chalcopyrite, the most abundant of them.*

*Refractory gold ores (impervious to direct cyanidation) are mainly processed by bioleaching in aerated and temperature-controlled stirred tank reactors. Since its advent some fifty years ago, bioleaching has been progressing regularly in terms of the number of plants where these two techniques are implemented, helping to confront the inevitable reality of the declining grade of ores and the complexity of deposits currently being or yet to be discovered, while the demand for metals continues to increase unabated.*

les projets où elle l'implante. Tandis que Mintek, l'institut de recherche sud-africain, ainsi que la société canadienne Bactec, vendent des licences d'exploitation.

Il n'y a pas de doute sur le fait que **la technologie de biolixiviation en tas** a un avenir sur le très long terme pour les raisons suivantes :

- plus encore que beaucoup de gisements exploités actuellement, ceux de l'avenir seront susceptibles d'être, au moins en partie, à trop faible teneur en métal de valeur pour supporter les coûts opératoires d'un broyage et d'une concentration ;
- les progrès de la technologie en tas ont permis d'acquérir une certaine maîtrise de l'oxydation de sulfures primaires comme la chalcopyrite, rendant son application extensible à encore plus de ressources.

**La biolixiviation en cuve agitée** reste une technologie d'opportunités qui ne peut pas remplacer l'utilisation des fonderies pour les métaux de base comme le cuivre pour des installations de grande capacité. En revanche, elle est très compétitive pour des projets de petite ou moyenne dimensions susceptibles d'extension. Ce qui déterminera l'application de cette technologie pour un projet donné est pour une bonne part le prix fixé par les raffineurs pour le traitement par voie pyrométallurgique des concentrés qui peuvent en relever. Le choix dépend de plusieurs paramètres, comme le caractère relativement imprévisible de la valeur du concentré, les pénalités imposées par la présence d'éléments à problème (arsenic, mercure, antimoine, bismuth, etc.), les coûts de transport engendrés par l'éventuel isolement du site de production et la volonté ou non de produire une substance plus ou moins facilement négociable (carbonate, hydroxyde ou métal pur par exemple).

Enfin, toute implantation d'installation industrielle s'accompagne désormais d'une évaluation très détaillée de ses caractéristiques en termes de développement durable. La rentabilité financière d'un projet est confrontée, au moins à une échelle locale, à une analyse de ses impacts sous tous ses aspects (économiques, sociaux et environnementaux). Dans ce domaine, la biolixiviation a quelques avantages, mais chaque projet a ses particularités et son contexte qui obligent à une analyse spécifique. ■

“  
La biolixiviation  
en cuve agitée reste  
une technologie  
d'opportunités.  
Elle est très compétitive  
pour des projets de petite  
ou moyenne dimensions  
susceptibles d'extension.”