

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie Minier



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

MEMOIR DE MASTER

Thème

Récupération de l'Argent contenu dans le minerai de la mine d'EL ABED par voie biologique sans milieu de culture

Réalisé par :

CHERIFI Mohamed Yacoub

Soutenu devant le jury :

Dr.OULD HAMOU Malek

Président

Dr.DERAMCHI Karima

Promotrice

Dr.BOUTRIA Samira

Co-promotrice

MM.MERCHICHI Amira

Examinatrice

Promotion juin 2015

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements :

À ma promotrice, madame DRAMCHI.K Professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger Chargée du cour d'analyse des minerais, et du laboratoire de chimie de notre département, ainsi que ma co-promotrice madame BOUTRIA.S Professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger chargée du cour de biomine,

Pour l'aide compétente qu'elles m'ont apportée, l'attention avec laquelle elles ont dirigé ce travail et leurs encouragements.

À Monsieur OULDHAMOU.M, Chef du département de Génie Minier et Professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger, chargé du cour de minéralurgie, Qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Hommages respectueux.

Je tien à le remercier pour tous les efforts qu'ils fournis et toutes les dispositions qu'il met au bien-être de ses étudiants.

À Madame MERCHICHI.A, Professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger, Qui m'a fait l'honneur de participer au jury et d'examiner ce travail.
Remerciements chaleureux.

Je ne saurais oublier tous ceux qui m'ont apporté leurs savoirs faire, leurs aides techniques, leur expérience, nécessaires pour la réalisation et le développement de ce travail.

Je remercie tout particulièrement Monsieur.HAMIOUD ; Directeur des mines au ministère de l'industrie et des mines et Monsieur le PDG de l'ORGM qui m'ont accepté au sein de leur établissement, Et à tout le personnel de la division mines du ministère ainsi l'équipe des laboratoires de l'ORGM, À Monsieur MENDILI,

Tami, Cherifi, sans tous oublier les ingénieurs et les techniciens de l'ORGM,
pour leur accueil chaleureux, leur gentillesse et leurs encouragements.

À mes professeurs du Département de Génie Minier, pour leur soutien, leurs
encouragements et leur compréhension, Durant toutes ces années.

Et finalement à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce
travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de notre sincère reconnaissance.

Dédicaces

On dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, en reconnaissance de leur soutien, amour, sacrifice et confiance qu'ils ont toujours su me donner et que je ne saurais jamais remercier autant, Un grand et tout particulier « Merci ».

À mes frère et ma sœur....Qui ont su m'encourager et me soutenir.

À tous les membres de ma famille sans exception.

CHERIFI Mohamed Yacoub

Résumé

L'une des innovations de l'art minier moderne est l'introduction de la biotechnologie au secteur.

Ce travail présente les résultats d'une étude (ensemble d'essais) menée sur la récupération de l'argent contenu dans le minerai de la mine d'EL ABED par des bactéries sans milieux de culture ou de conditions favorables (en utilisant une boue activée) et un essai de valorisation du métal contenu.

Donc cette petite étude a pour but de déterminer le taux de récupération et la gamme de performance de ces bactéries dans un tel milieu. Comme elle vise à dresser une synthèse sur la biotechnologie appliquée aux mines. Sur les micros organismes et le comportement des bactéries au contact du métal Argent (Ag).

Les informations qui découlent de ce type d'essais servent à aiguiller le choix d'un ou plusieurs procédés potentiels, dans la problématique de l'exploitation des minerais à faible teneur et de la réhabilitation des sols pollués, et apporter une contribution financière à l'activité minière.

Mots clés : micros organismes ; bactérie ; Argent ; bio lixiviation ; biominés ; boues activées; eaux de drainage.

ملخص :

واحدة من الابتكارات في مجال الصناعة المنجمية هي إستعمال البكتيريا لإسترجاع المعادن و تطهير الأراضي الملوثة. هذا العمل يعرض نتائج دراسة (مجموعة من التجارب) التي تسمح بإسترجاع معدن الفضة على مستوى عينة خامة من منجم العابد عبر بكتيريا دون وسط مغذي أو توفير ظروف مفضلة.

لذا تهدف هذه الدراسة الصغيرة لتحديد معدل الإسترجاع لهذه البكتيريا في مثل هذا الوسط. كما تهدف إلى جعل تركيبة من التكنولوجيا الحيوية تطبق على التعدين وعلى الكائنات الحية الدقيقة وسلوك البكتيريا في الإتصال مع معدن الفضة (Ag). يتم استخدام المعلومات الناتجة عن مثل هذه التجارب لتوجيه و اختيار الطرق المحتملة في مشكلة استغلال الخامات منخفضة الدرجة وإعادة تأهيل التربة الملوثة، والمساهمة ماليا في نشاط التعدين.

كلمات البحث: الكائنات الحية الدقيقة. البكتيريا. الحيوي الرشح. المعادن, الفضة; الإسترجاع

Abstract :

One of the innovations of modern mining art is the introduction of biotechnology in industry.

This work presents the results of a study (set of tests) conducted on the recovery of silver in the ore from the mine EL ABED by bacteria without nutritional environment or favorable conditions (using a slurry On) by valuating contained metal.

So this small study aims to determine the recovery rate and the performance range of this process and these bacteria in such an environment. As it aims to make a synthesis of biotechnology applied

to mining and on micro organisms and the behavior of bacteria in contact with the silver (Ag).
The information resulting from such tests are used to establish the choice of one or several potential methods in the problem of the exploitation of low-grade ores and rehabilitation of polluted soil, and contribute financially to the mining activity.

Keywords: micro organisms; bacteria; silver; bio leaching; biomines; Activated sludge.

Abréviations

ADN : acide désoxyribonucléique

ARN : acide ribonucléique

SAA : Spectrométrie d'Absorption atomique

Ag : Argent « métal »

Ag NO₃ : nitrate d'argent

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE :	2
I.1 BIOMINE :	5
I.1.1 Développement durable des procédés de biomine :	5
I.1.2 Impact de la Biomine :	6
I.2 BIOLIXIVIATION :	6
I.2.1 Biolixiviation des minerais sulfurés :	7
I.3 Procédés :	11
I.3.1 Procédé statique :	11
I.3.2 Biolixiviation en réacteur agité :	13
I.4 Les techniques biologiques utiliséES dans la dépollution :	13
II. CLASSIFICATION DU MONDE VIVANT.....	16
II.1 Caractéristiques générales des micro-organismes :	16
II.1.1 Entre classification et diversité :	16
II.1.2 Classification :	18
III. Définition d'une bactérie :	20
III.1 STRUCTURE D'UNE BACTERIE :	20
III.2 CLASSIFICATION DES BACTERIES :	20
III.2.1 Formes des bactéries:	21
III.3 Les types de bactéries :	22
III.3.1 Selon la structure et la composition de l'enveloppe cellulaire.	23
III.3.2 Selon la morphologie.....	23
III.3.3 Selon le mode respiratoire.	24
III.3.4 Selon le type trophique.	24
III.4 Biotope et niche écologique.....	25
III.5 Principaux paramètres physico-chimiques.....	25
III.5.1 Eau disponible / activité de l'eau.	25
III.5.2 Notion de pH.....	26
III.5.3 Température.....	26
III.5.4 Pression.	27
III.5.5 Présence ou absence d'oxygène.	27
III.6 Culture des bactéries :	28
III.7 METABOLISME ET CROISSANCE en milieu non renouvelé:.....	28
III.8 Provenance des bactéries utilisée en biomine :	29
III.9 Boue activée :	29

III.10	Eaux de Drainage minier :	30
III.10.1	Les eaux acides :	30
IV.	Impact des résidus miniers sur l'environnement :	33
IV.1	Impacts ENVIRONNEMENTAUX et sociaux de l'exploitation minière	33
IV.1.1	Impacts sur les ressources en eau.....	33
IV.2	Le drainage d'acide minier et la lixiviation des contaminants	34
IV.3	Impacts des projets miniers sur la qualité du sol.....	34
IV.4	LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX AUX POTENTIELS :	35
IV.5	ADSORPTION ET DESORPTION :	35
IV.5.1	Adsorption :	35
IV.5.2	Désorption :	35
V.	Généralité sur l'Argent :	37
V.1	Propriétés :	37
V.2	Abondance :	37
V.3	Applications industrielles de l'argent et de ses sels:	38
V.4	Toxicité et impact écologique et environnemental de l'Argent :	39
V.4.1	Toxicité :	39
V.4.2	Effets de l'argent sur la santé :	40
V.4.3	Effet de l'Argent sur l'environnement et l'écosystème :	40
V.5	Analyses de l'Argent :	43
VI.	Préparation mécanique du minerai :	46
VI.1	Stade de fragmentation.....	46
VI.1.1	Concassage :	46
VI.1.2	Broyage :	46
VI.2	Analyse granulométrique :	47
VII.	Minerai d'EL ABED :	50
VII.1	Caractérisation minéralogique du minerai :	50
VII.2	ESSAIS :	51
VII.2.1	Préparation du minerai d'EL ABED :	51
VII.2.2	Procédure des essais de biolixiviation :	51
VII.3	Résultat :	51
VII.3.1	Analyse du minerai d'EL ABED :	51
VII.3.2	Expérimentation :	52
VII.4	Résultats des essais de biolixiviation :	54
VII.4.1	PH de la solution lixiviée :	54
VII.4.2	Adsorption de l'Argent par les bactéries :	54

VII.4.3 Lixiviation :	55
VIII. Conclusion générale :	58
PERSPECTIVES.....	60
Bibliographie.....	62
ANNEXES.....	64

Liste des figures

Figure 1 – Aperçu des diverses techniques de lixiviation statique appliquées aux minerais de cuivre	12
Figure 2 - structure d'une bactérie.....	20
Figure 3- Les différentes formes des bactéries	21
Figure 4- comportement des différentes formes au Gram+ et Gram-.....	22
Figure 5. — Comportement des bactéries dans un milieu aqueux.....	25
Figure 6: taux de croissance des bactéries en fonction de la température	27
Figure 7: influence de la pression sur les bactéries.....	27
Figure 8-Courbe de croissance bactérienne.....	28
Figure 9- procédure simplifiée du tamisage à sec.....	48
Figure 10- lame mince confectionné du minerai d'EL ABED observé sous le microscope.....	50
Figure 11- minerai d'EL ABED en section polie observé sous le microscope	50
Figure 12: pesée des échantillons	52
Figure 13: chauffage des échantillons attaqués par l'eau régale.....	52
Figure 14: filtrage après l'attaque par les acides	53
Figure 15 : spectromètre d'absorption atomique à flamme.....	53
Figure 16 taux d'argent dans les différents échantillons prélevés à EL ABED.....	54
Figure 17: évolution d'un minerai lors d'une biolixiviation.....	65
Figure 18: Images MEB montrant l'évolution des bactéries sur les grains de carrolite en cours de biolixiviation.	66
Figure 19: Exemple de test gram (+;-) sur des bactéries.....	67

Liste des tables

Tableau 1- catégorie des protistes	18
Tableau 2: classes des bactéries en fonction de leur résistance à la température.....	26
Tableau 3: classification des bactéries en fonction de la présence ou l'absence d'oxygène.....	28
Tableau 4- phases d'une population bactérienne.....	29
Tableau 5- Caractéristiques des principales bactéries acidophiles oxydatrices du fer et du soufre	31
Tableau 6- quelques propriétés de l'Argent (Ag).	37
Tableau 7 taux d'Ag dans les échantillons prélevés à EL ABED.....	53
Tableau 8 : Analyse de l'échantillon de biolixiviation du minerai d'EL ABED par la SAA	55
Tableau 9 : Analyse du filtrat de l'échantillon de biolixiviation par la SAA	55

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Ces dernières années, les gisements contenant de l'Argent directement récupérable par traitements physiques (concentration par gravité) ou chimiques traditionnels sont devenus de plus en plus rares. C'est ainsi que les minerais argentifères, dont l'argent, peu ou pas extractibles par ces traitements, sont devenus une source supplémentaire d'Ag. Dans un de ces types de minerais argentifères, l'Ag est finement disséminé dans les sulfures (galène et/ ou blende) et un traitement chimique directe, même après un broyage très poussé, ne permet d'extraire qu'une faible fraction de l'Ag inclus dans les sulfures.

Un prétraitement pour libérer l'Ag inclus dans les sulfures est donc nécessaire pour rendre le minerai exploitable par les méthodes classiques. Les solutions techniques retenues à ce jour sont fondées sur l'oxydation des sulfures porteurs d'Ag. Trois procédés d'oxydation sont principalement retenus à l'heure actuelle : le grillage oxydant, l'oxydation sous pression et l'oxydation bactérienne des sulfures, les deux premiers étant à ce jour très privilégiés pour les traitements industriels.

Cependant, le grillage oxydant présente, malgré sa technologie largement éprouvée, des inconvénients, tels d'une part les risques importants de pollution dus à l'émanation de gaz toxiques dans l'atmosphère (~, As₂O₃ et autres), et d'autre part les faibles récupérations d'Ag. Par ailleurs, bien que l'utilisation de l'oxydation sous pression permette des rendements d'extraction de l'Ag convenables sans risques écologiques majeurs, cependant les coûts élevés de sa mise en place mais encore plus le traitement lui-même conduisent à la recherche d'une autre technique oxydante plus économiquement envisageable.

Si l'oxydation bactérienne des sulfures en cuves agitées par *Thiobacillus ferrooxidans* est une voie retenue pour le traitement de concentrés sulfurés argentifères et fait l'objet de nombreuses recherches les procédés mis au point sont coûteux et ne peuvent s'envisager économiquement que pour des concentrés de flottation à teneur élevée en Ag. Le traitement des gisements argentifères sulfurés à faible tonnage et/ou à faible teneur n'est donc pas envisageable actuellement pour l'un de ces procédés. Par contre, pour ce dernier type de gisements, la biolixiviation en tas du minerai, en préalable à la dissolution d'Ag, est une option qui, peu envisagée jusqu'à présent, se doit d'être discutée.

Les recherches concernant l'utilisation de la biolixiviation pour le traitement statique de minerais argentifères sont en effet peu nombreuses. Elles ne comportent que quelques essais en colonnes de laboratoire et à l'échelle pilote, mais l'étude de l'influence des différents paramètres qui contrôlent une oxydation bactérienne des sulfures n'a pas été traitée en détail (Belin *et al.*,

1991, Rossi et Castro, 1991). Les résultats ainsi obtenus se limitent donc aux seuls minerais étudiés.

C'est donc pour étudier le comportement des bactéries dans des dispositifs de lixiviation de sulfures (plus particulièrement de la blende et de la pyrite) et le processus de la biolixiviation qu'a été entrepris ce travail.

Et un deuxième intérêt de cette technologie est la dépollution et la réhabilitation des sites pollués car les pays industrialisés comptent de grandes surfaces de terrains contaminés.

Cette pollution des sols est généralement le fait de l'activité minière, pétrolière ou d'autres activités industrielles encore, comme la sidérurgie, la cokerie, la chimie ou la fabrication de peinture par exemple. Le recensement des sites et sols pollués et la caractérisation des polluants met en évidence la contamination par les métaux (cuivre, zinc, plomb, cobalt, nickel, arsenic, cadmium), les hydrocarbures légers (fuel, essence, gazole) et lourds (lubrifiants, huiles lourdes, pétrole brut), les solvants halogénés, et d'autres molécules complexes encore (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP, etc.). Les composés organiques seraient impliqués dans près de 75 % des sites pollués.

La dépollution des sites contaminés est une préoccupation majeure, en raison d'une part, de l'impact de cette pollution sur l'environnement et la santé, liée notamment à la propagation des molécules dangereuses dans le milieu et leur transfert dans les nappes phréatiques et dans la chaîne alimentaire, et d'autre part des coûts exorbitants engendrés par les projets de réhabilitation qui exigent souvent l'excavation des sols et le transport onéreux des terres vers les installations de dépollution.

Chapitre I

Biotechnologies minières

I.1 BIOMINE :

La Biomine a pour vocation de contribuer à la construction de "la production de demain" et participe à une recherche en biotechnologie pour des "changements radicaux dans l'industrie des matériaux de base pour une production plus propre, plus sûre et soucieuse de l'environnement". L'objectif de la Biomine est de développer des solutions durables pour le cycle de vie total des produits et des équipements.

Les progrès techniques envisagés vont permettre l'intégration de procédés basés sur des biotechnologies innovantes pour l'extraction et la récupération des métaux provenant de ressources européennes primaires comme les minerais et les concentrés, et secondaires comme les résidus miniers, les scories métallurgiques, les déchets riches en métaux et les cendres de combustion d'usine. Les procédés vont être développés en privilégiant des matériaux de conception écologique et renouvelable, ne conduisant à aucun déchet, dans le but de protéger les populations et l'environnement.

A l'appui d'une recherche microbiologique appliquée ambitieuse, les techniques qui sont évaluées dans ce projet incluent la biolixiviation, la biooxydation, la biosorption, la bioréduction, la bioaccumulation, la bioprécipitation, la bioflottation, la biofloculation et les biocapteurs. L'objectif ultime est la mise en exploitation de biotechnologies respectueuses de l'environnement et économiquement attractives plus particulièrement à petite échelle. Elles fourniront une alternative aux technologies conventionnelles.

Les concepts de nouveaux procédés issus du programme de recherche seront évalués jusqu'à l'échelle pilote et s'accompagneront d'estimations de rentabilité économique. Ces travaux devront fournir aux entreprises industrielles concernées les moyens de décider de la poursuite ou non d'une démonstration commerciale de ces procédés innovants sur leurs propres ressources. L'ensemble des activités de recherche inspireront la création d'outils de formation et d'éducation dans le domaine de la biohydrométallurgie.

La Biomine doit adopter une approche pluridisciplinaire impliquant des universités, des organismes de recherche, des compagnies minières, des entreprises de traitement des déchets et des fournisseurs d'équipements et d'instruments.

I.1.1 Développement durable des procédés de biomine :

Si les techniques biohydrométallurgiques sont appelées à jouer un rôle croissant dans l'industrie minière, le caractère durable des procédés mis au point ne pourra toutefois être acquis que sur la base d'innovations significatives résultant de travaux scientifiques et technologiques de pointe.

L'exploitation commerciale des procédés de ce domaine ne sera par ailleurs fiable qu'à travers une optimisation soutenue des conditions de leur application (moindre consommation d'énergie et de matériaux bruts, réduction voire élimination des déchets).

L'application des techniques biohydrométallurgiques au nom du développement durable repose sur quatre motivations fortes :

- la compétition économique sur le long terme, du fait des bénéfices financiers tirés des procédés propres et de l'exploitation de nouvelles ressources métallifères ;
- l'épuisement des ressources primaires exploitées à l'aide de procédés plus conventionnels arrivés à leurs limites d'optimisation ;
- les politiques gouvernementales, qui mettent en application et encouragent des changements d'usage ; et,
- la pression du public, qui joue un rôle stratégique au moment où les compagnies cherchent à établir une plus grande acceptabilité environnementale.

I.1.2 Impact de la Biomine :

L'introduction de procédés biohydrométallurgiques peut conduire à de substantiels progrès dans l'industrie de la production de métaux en augmentant le profit par une amélioration de leur récupération, une réduction des coûts de production et l'exploitation de nouvelles ressources. Le potentiel d'avancée technologique est mis en évidence par l'intérêt croissant montré par l'industrie minière et métallurgique dans ce domaine. La diversification des cibles de ressources et de métaux concernés constitue un élément majeur de développement.

La Biomine peut combler les manques actuels dans notre compréhension du meilleur moyen d'appliquer les procédés biologiques pour les minerais métallifères traditionnellement considérés comme réfractaires aux traitements conventionnels pour des raisons techniques et économiques. Le projet va mettre en synergie les travaux des experts européens et sud-africains dans le domaine de la microbiologie de la transformation des métaux et l'intégration de cette expertise aura un impact majeur sur la recherche dans ce domaine en Europe.

I.2 BIOLIXIVIATION :

La biolixiviation ou biooxydation est un procédé qui utilise des microorganismes pour catalyser les réactions d'oxydation de certains minéraux. Durant ce processus, les micro-organismes utilisent les minéraux comme source d'énergie en captant des électrons pour leur développement. Ce processus autocatalytique existe dans la nature et les microorganismes qui sont à l'origine de ce processus peuvent être isolés dans les eaux des sites à drainage minier acide (bactéries mésophiles) ou des sources hydrothermales (bactérie thermophiles).

Comparée aux autres procédés de dissolution des minéraux utilisés conventionnellement, la biolixiviation est un procédé simple, économique rentable et sûr sur le plan environnemental puisqu'elle se déroule sans rejet de SO₂ dans l'atmosphère (Brierley et Brierley, 2001).

Elle offre la possibilité de traiter des minerais pauvres (moins de 1% de cuivre par exemple) et des concentrés. Elle n'exige pas le séchage des minerais comme en pyrométallurgie, utilise moins d'énergie et se réalise à des pressions et températures faibles. Les inconvénients majeurs de ce procédé sont la faible vitesse des réactions et l'obtention de solutions diluées.

Initialement, la lixiviation bactérienne était utilisée pour les minerais de cuivre secondaires qui offrent des cinétiques de lixiviation un peu plus rapides que les autres sulfures.

Aujourd'hui, elle est développée pour l'extraction d'autres métaux tels que le zinc, l'uranium, l'or et l'argent des minerais réfractaires... (Steemson et al. 1997). Cette technique de mise en solution des sulfures est même actuellement envisagée par plusieurs chercheurs (Gomez et al., 1997 ; Gomez et al. 1999 ; Deveci et al. 2003 ; Rodriguez et al. 2003 ; Pina et al. 2004 ; Tipre et Dave, 2004, Gericke et al, 2008) comme alternative pour la métallurgie des sulfures complexes qui sont difficiles à traiter par le schéma classique de la flottation différentielle suivi de la pyrométallurgie suite à la dissémination des sulfures valorisables dans la matrice de pyrite.

I.2.1 Biolixiviation des minerais sulfurés :

I.2.1.1 Principes réactionnels et conditions opératoires générales :

La biolixiviation est un procédé biotechnologique de métallurgie extractive qui a fait l'objet d'une mise en pratique industrielle très significative ces vingt dernières années.

Elle repose sur l'oxydation chimique des minéraux sulfurés en milieu sulfurique acide avec un effet que l'on pourrait qualifier de catalytique exercé par des micro-organismes.

La compréhension des mécanismes de biodégradation des minéraux sulfurés fait l'objet de travaux de recherche depuis plusieurs décennies et est encore sujette à des interprétations disputées.

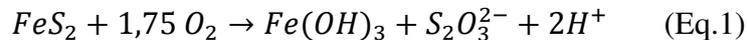
Les sulfures métalliques ont une réactivité vis-à-vis de l'acidité qui permet de les ranger en deux catégories. Certains sont solubles en condition acide, comme la sphalérite (ZnS), la pyrrhotite (Fe_{1-x}S), la chalcopyrite (CuFeS₂), l'arsénopyrite (FeAsS) et la galène (PbS).

Les autres sont insolubles comme la pyrite (FeS₂), la molybdénite (MoS₂), et la tungsténite (WS₂). Dans tous les cas, c'est une réaction d'oxydation qui permettra de les décomposer en libérant efficacement leur contenu métallique.

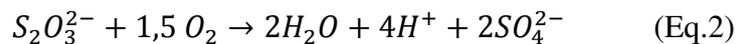
- Le plus emblématique de tous les minéraux sulfurés, quant aux mécanismes de l'oxydation, est la pyrite. Il est le plus répandu dans la nature et son oxydation est à l'origine des conséquences environnementales parmi les plus observables de l'activité

minière, à travers la production d'effluents acides et chargés en métaux lourds appelés drainages miniers acides.

La pyrite est parfaitement stable en condition sèche et dépourvue d'oxygène. En revanche, en présence d'humidité et d'oxygène, elle se décompose selon l'équation suivante :

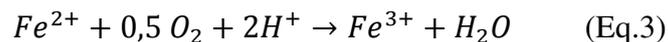


Le fer ferreux libéré par la pyrite est spontanément oxydé par l'oxygène en fer ferrique dont la précipitation sous forme d'hydroxyde génère de l'acidité, il en est de même du thiosulfate qui s'oxyde en sulfate en présence de bactéries oxydantes des espèces soufrées suivant :



En contexte naturel, l'acidité générée est soit neutralisée par des minéraux basiques comme des carbonates, soit accumulée jusqu'à des niveaux élevés donnant lieu à des pH inférieurs à 2,5.

Le fer ferrique, qui peut oxyder les sulfures directement, est produit en milieu acide par la réaction :



La cinétique de cette réaction est considérablement amplifiée par la présence des micro-organismes qui en tirent l'énergie nécessaire à leur croissance. Ainsi des micro-organismes sulfo-oxydants produisent de l'acide sulfurique en dégradant les formes réduites du soufre, tendant à rendre le milieu acide, et des micro-organismes ferro-oxydants produisent en milieu acide du fer ferrique qui décompose de façon accélérée les sulfures métalliques. Il semblerait qu'il y ait deux mécanismes complémentaires de l'action chimique exercée par les micro-organismes reposant sur l'utilisation du fer ferrique comme agent oxydant :

- l'un, dit de contact, passerait par l'attachement des micro-organismes à la surface des minéraux et l'action oxydante du fer ferrique combinée aux polysaccharides qui lient les cellules à la surface minérale ;
- l'autre, dit de non-contact, agirait par l'oxydation biologique du fer ferrique en milieu liquide, lequel oxydant s'attaquerait chimiquement aux sulfures métalliques.

I.2.1.2 Biolixiviation des matières non sulfurées :

Deux types de minéraux correspondant à des options de procédés différentes sont envisagés et exposés ci-après. Il y a d'une part les minéraux transformés pour être valorisés sous forme d'un composé différent du produit naturel et d'autre part les minéraux rendus valorisables en éliminant les impuretés qui les pénalisent.

Sulfato-réduction :

La sulfato-réduction est la propriété de nombreuses espèces bactériennes d'intervenir dans le cycle d'oxydo-réduction du soufre, sont relevés ainsi :

- les organismes sulfato-réducteurs comme ceux du genre *Desulfovibrio* ;
- des organismes aérobies tels que *Thiobacillus* et divers hétérotrophes ;
- diverses archaebactéries (des méthanogènes et des formes dépendantes du soufre pour leur croissance).

La sulfato-réduction s'opère suivant deux modes :

- l'assimilation du sulfate pour transformation en sulfure nécessaire au métabolisme de synthèse ;
- la dissimilation du sulfate qui est un moyen de production d'énergie, le sulfate et autres composés du soufre (excepté le sulfure) servant d'accepteurs d'électrons dans des oxydations génératrices d'énergie ATP (adénosine triphosphate) effectuées à l'abri de l'air.

C'est la dissimilation du sulfate qui fait excréter de grandes quantités de sulfure aux bactéries sulfato-réductrices.

Il existe des ressources considérables de sulfate sous forme de gypse issu de l'industrie phosphatière et, depuis assez longtemps, il a été imaginé de transformer le sulfate du gypse en soufre élémentaire par voie biologique.

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) a particulièrement étudié, il y a une trentaine d'années, l'utilisation de divers substrats carbonés, lactosérums et mélasses, pour la bioconversion du phosphogypse en sulfure. Le choix du système réactionnel lui-même et l'innocuité des rejets finaux du traitement sont des sources de difficulté pour rendre le procédé techniquement et économiquement viable.

I.2.1.3 Bio extraction des métaux :

Les micro-organismes, incluant les ascomycètes, les cyanobactéries, les algues, les champignons et les levures, ont la capacité d'accumuler les métaux lourds et les radionucléides présents dans leur environnement. Les cellules vivantes comme les cellules mortes ont la propriété de fixer et d'accumuler les ions métalliques.

I.2.1.3.1 Principes de concentration des métaux par voie microbiologique :

La concentration biologique intervient de diverses façons.

Adsorption à la surface des cellules :

La surface des cellules, parce qu'elle est chargée négativement du fait de la présence de groupes carboxylate, hydroxyl et phosphate dans les polymères de la paroi cellulaire, capte les cations métalliques.

Des groupes non chargés, comme les peptides azotés, peuvent se comporter en ligand pour compléter les sites de coordination du cation métallique.

Des micro-organismes différents présentent des distributions de charge et de géométrie variées susceptibles de retenir sélectivement certains cations métalliques. La capacité de rétention du métal dépend aussi du pH du fait de la protonation de ces groupes.

Les champignons et les levures sont connus pour accumuler des métaux à fortes concentrations à la surface comme à l'intérieur des cellules. Les organismes ont des parois constituées de chitine ou de chitosane, dont la glucosamine constitue le ligand pour les métaux, avec d'autres groupes fonctionnels tels que phosphate, carboxyl, amine, etc.

Pénétration et accumulation dans la cellule :

Plus lente que la fixation à la surface de la cellule, l'accumulation dépend du métabolisme et peut être bloquée par des changements de température ou la présence d'inhibiteur. En revanche, le potentiel de rétention est plus élevé.

Production de composés précipitant :

Des bactéries comme *Desulfovibrio desulfuricans* transforment le sulfate en sulfure excrété par la cellule. L'apparition de sulfure en solution provoque la précipitation de la plupart des métaux lourds sous forme de sulfure métallique. De même, les matières biologiques qui se dégradent dans les effluents industriels en l'absence d'oxygène libèrent des sulfures qui font précipiter les métaux. De tels phénomènes peuvent être à l'origine de certains gisements sulfurés métalliques. On connaît aussi la précipitation d'oxalates métalliques à partir de l'acide oxalique produit par certains organismes et la production de phosphate extracellulaire qui provoque la précipitation de phosphate d'uranium (*Citrobacter*).

Par ailleurs, la biomasse fournit en quantité des polymères qui peuvent être utilisés pour leur action coagulante, c'est-à-dire créatrice d'agrégats de matière colloïdale appelés floes, et pour leur action floculante, en générant des ponts entre les microflocs, qui accélèrent la sédimentation de solides dans les boues de rejet. Les biopolymères, tels que polysaccharides, polypeptides et acides nucléiques, de grandes masses moléculaires et de faibles densités de charge, peuvent être modifiés chimiquement pour avoir une ionicité et une charge leur permettant d'agir comme coagulant.

Volatilisation du métal :

Un certain nombre de métaux et métalloïdes dont le plomb, l'arsenic, l'étain et le mercure ont la propriété d'être méthylés par voie biologique ; ces méthyles sont volatils.

I.3 Procédés :

On distingue le procédé statique, et ses différents modes de mises en œuvre, et le procédé dynamique. Le procédé statique, qui a initié cette filière de production, consiste à réaliser la biolixiviation en faisant percoler la solution aqueuse à travers la masse du substrat solide préalablement fracturé ou concassé. Le procédé dynamique appliqué à un matériau solide finement divisé confine le traitement dans des réacteurs agités et aérés.

Le premier, de moindre coût de revient, s'applique aux gisements à faible teneur ou aux stériles de traitements ultérieurs (minerais de cuivre, de nickel, de zinc et d'uranium). Le second, plus coûteux à la tonne de métal produit, mais rapide et efficace, concerne des minerais plutôt riches et des métaux de haute valeur ajoutée (or et marginalement cobalt).

I.3.1 Procédé statique :

La biolixiviation est pratiquée en mode statique sous diverses formes. La figure 4 montre schématiquement les diverses techniques utilisées sur les minerais de cuivre qui en sont la cible privilégiée.

- Le traitement in situ s'applique lorsque l'encaissant, qui environne le dépôt sulfuré, est imperméable et permet la récupération de solution lixivante. La technique peut consister à traiter le dépôt vierge lui-même ou les galeries de mine après extraction des ressources valorisables par un traitement conventionnel. Dans les deux cas, le gisement et son encaissant doivent avoir des caractéristiques évitant tout risque pour l'environnement ; confinement, limites spatiales parfaitement connues, porosité du dépôt et imperméabilité de l'encaissant.
- Le traitement d'amas concerne des haldes de mine ou des minerais à faible teneur (< 0,4 % Cu), comme à Bingham Canyon aux Etats-Unis, où des amas de plusieurs millions de tonnes sont constitués. Le minerai, de charge par camion sur un sol étanche, est directement issu de la mine, sous forme de fines particules ou de blocs de plusieurs mètres.

Une attention particulière est apportée afin d'éviter le tassement et le compactage de la matière solide. La solution lixivante dont la surface des amas est arrosée doit donc percoler de façon aussi uniforme que possible.

Cette solution est une eau acide (pH 1,5 à 2,0) à laquelle on peut ajouter des éléments nutritifs (surtout de l'azote, dans des proportions à établir au laboratoire). Après percolation, la liqueur riche

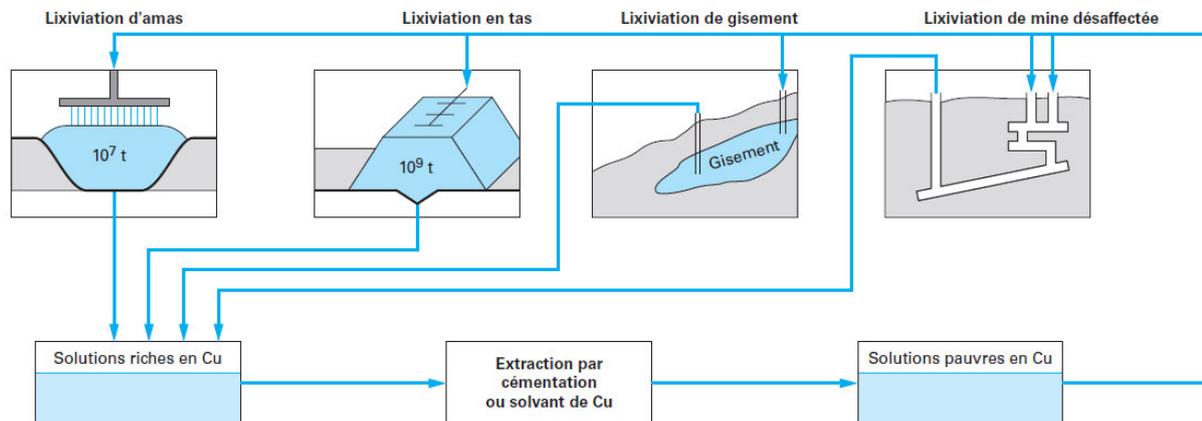
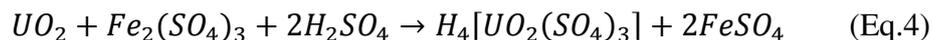


Figure 1 – Aperçu des diverses techniques de lixiviation statique appliquées aux minerais de cuivre

- La lixiviation en tas utilise du minerai concassé jusqu'à quelques centimètres déposé sur un sol compacté et étanchéifié par un revêtement plastique, sur une hauteur de quelques mètres. L'arrosage et la récupération des solutions lixiviantes sont plus sophistiqués que pour les techniques précédentes. La lixiviation en tas a été appliquée, en France, aux minerais d'uranium à faible teneur. Elle utilise le fer ferrique produit par oxydation biologiquement catalysée du fer ferreux, comme oxydant de l'uraninite pour dissoudre l'uranium, à travers la réaction suivante :



Les moyens utilisés s'apparentent à ceux de la cyanuration en tas des minerais d'or appliquée sur des centaines de sites de par le monde.

- La lixiviation statique a comme limites d'efficacité :
 - le manque d'accès direct de la majeure partie de la surface des sulfures au contact avec la solution lixiviante et à l'attaque par les bactéries, du fait de la fragmentation trop limitée des solides ;
 - les effets de colmatage résultant du transport de fines particules ou des précipités générés par les réactions ;
 - le manque d'accès de l'oxygène et du dioxyde de carbone à la solution aqueuse de percolation ;

- de l'insuffisance des transferts de chaleur conduisant à des effets de surchauffe localisés dus à un emballement de l'oxydation, qui détruisent la biomasse ou l'inverse, c'est-à-dire des variations de température trop importantes pour la partie exposée à l'air libre ;
- d'une manière générale les effets de variations climatiques importantes.

I.3.2 Biolixiviation en réacteur agité :

Cette technique confine le traitement dans des réacteurs équipés d'une agitation mécanique qui maintient une suspension homogène du solide et une dispersion efficace de la phase gazeuse injectée.

Le minerai est concassé, puis broyé en particules d'un diamètre moyen inférieur à 100 mm, dimension influant la cinétique de biodégradation des sulfures. En principe et jusqu'à une certaine limite, plus petite sera la taille des particules, plus grande sera la surface disponible pour l'attaque bactérienne, et par conséquent plus rapide la réaction de dégradation. Une flottation peut permettre de concentrer la phase riche en sulfure porteur du métal à extraire.

L'unité de biolixiviation est alimentée d'une pulpe de minerai, ou de son concentré sulfuré, à une concentration en solide à une valeur proche de 20 % (rapport en pourcentage de la masse de solide à la masse de pulpe) mais variable suivant la composition du minerai traité. Il est évident que, pour un débit donné de minerai et une rétention nécessaire en biolixiviation, la concentration en solide de la pulpe fixe la taille des bioréacteurs, il faut donc l'élever le plus possible. La concentration en solide tient essentiellement à la limitation du transfert de l'oxygène de la phase gazeuse à la phase liquide, et donc à la limitation de la disponibilité de l'oxygène pour oxyder les sulfures. La température optimale de culture des micro-organismes est généralement de l'ordre de 35°C, mais en pratique industrielle on s'efforce de maintenir la température du traitement à la valeur la plus élevée possible. La raison en est que la forte exothermicité des réactions d'oxydation impose le refroidissement du milieu (qui représente un coût significatif) et que les cinétiques de biodégradation sont plus rapides à température élevée.

I.4 Les techniques biologiques utilisées dans la dépollution :

Les techniques de traitement à identifier et à caractériser dans le cadre de cette étude sont les techniques biologiques, c'est-à-dire les techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant pour réaliser l'opération de dépollution. Ce sont des techniques de décontamination (extraction ou dégradation du contaminant) ou d'assainissement (réduction des risques, c'est-à-dire des impacts sur les récepteurs *via* un abattement des sources d'exposition, des doses reçues par les récepteurs ou des organismes présents).

L'organisme vivant utilisé peut être un microorganisme (bactérie, champignon), un végétal (algue, plante, arbuste, arbre), un végétal complexe formé de l'association symbiotique d'un champignon et d'une algue, voire un animal (lombric, vers de terre). Cet organisme vivant agit sur le composé polluant par absorption, accumulation, digestion, transformation, dégradation, évapotranspiration, etc., pour le rendre moins toxique, l'extraire, l'immobiliser ou le diluer considérablement.

On considèrera aussi bien les techniques utilisées individuellement, que celles combinées à un autre procédé qu'il soit physico-chimique, thermique ou biologique. Ainsi, on s'intéressera aux techniques mises en œuvre de la manière suivante :

- ***in situ*** : traitement du sol sur le site même, sans excavation
 - ex : phytoremédiation
- ***sur site*** : traitement du sol excavé sur le site même, avant d'être remis en place
 - ex : bioréacteur
- ***hors site*** : traitement du sol qui a été excavé et transporté vers un centre de dépollution
 - ex : biocentre

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt a été porté sur les techniques biologiques innovantes et dont le stade de développement se rapproche de l'application sur le terrain et de la commercialisation.

Les techniques déjà anciennes et dont la mise en œuvre évolue peu n'ont pas été prises en compte.

Chapitre II

Les micros organismes

II. CLASSIFICATION DU MONDE VIVANT

Classification contemporaine du monde vivant

- Animaux : métazoaires eucaryotes
- Plantes : eucaryotes
- Protistes supérieurs : eucaryotes
 - Protozoaires
 - Champignons microscopiques

- Protistes inférieurs : procaryotes
 - Bactéries

- Virus : ce n'est pas une cellule, ce n'est pas un organisme !!!
- (prion)

II.1 Caractéristiques générales des micro-organismes :

Les micro-organismes (du grec *micro*, petit et *bios*, vie) sont des êtres vivants invisibles à l'œil nu, unicellulaires ou pluricellulaires mais, dans ce cas, les cellules ne sont pas différenciées en tissu.

Sous ce terme sont regroupés virus, bactéries, protistes, algues et champignons microscopiques. Ce sont des organismes ubiquitaires qui représentent la biomasse la plus importante de la Terre.

II.1.1 Entre classification et diversité :

La classification phylogénétique, organisée autour des liens de parenté entre les êtres vivants, est basée sur les **séquences d'ADN** et l'**analyse cladistique**. Elle remplace aujourd'hui la classification scientifique traditionnelle basée sur des caractères multiples (biologiques, phénotypiques, physiologiques). Elle divise les organismes vivants en **trois domaines** : les archées, les eubactéries et les eucaryotes.

Les **archées** ou *Archaea* ou **archéobactéries** (du grec *archaios*, ancien et *backterion*, bâton) constituent un taxon du vivant caractérisé par des cellules **sans noyau** et l'absence d'organites (structure procaryote). Elles se distinguent des eubactéries par certains caractères biochimiques comme la constitution de la membrane cellulaire ou le mécanisme de réplication de l'ADN. Les archées sont extrêmement diversifiées. Certaines sont connues pour leur capacité à vivre dans des conditions extrêmes mais il existe beaucoup d'archées vivant dans des biotopes plus courants et très variés comme le sol, les lacs, la mer ou l'intestin des animaux.

Sur la base de critères métaboliques, les archées ont été divisées en **trois groupes** : méthanogènes, halophiles et thermophiles. La comparaison génétique, principalement de l'ARNr 16S, permet de les classer en **deux phyla**, *Crenarchaeota* et *Euryarchaeota*.

Les **eubactéries** ou *Eubacteria* se distinguent des eucaryotes par leur structure procaryote. Ce sont des organismes **unicellulaires** de tailles (0,2 à 50 µm) et de formes variées. Elles comportent une paroi et leur information génétique est organisée sous forme d'un chromosome circulaire.

Les **eucaryotes** ou *Eukariota* (du grec *eu*, vrai et *karuon*, noyau) peuvent être **unicellulaires** ou **pluricellulaires**. Leur matériel génétique est enfermé dans un **noyau** délimité par une membrane ; ils possèdent des mitochondries ; la multiplication cellulaire a lieu par mitose ; l'ADN est divisé en chromosomes et ils présentent une reproduction de type sexuée.

Le domaine des eucaryotes est partagé en **trois règnes** : les **plantes**, les **champignons** et les **animaux**. Sont classés dans le règne des **champignons** (*Fungi*) les organismes de structure eucaryote et hétérotrophes vis-à-vis du carbone qu'ils doivent trouver dans leur environnement. On parle de moisissures pour désigner les champignons chez lesquels les organes de fructification ont une structure nettement filamenteuse. Chez les levures, la forme unicellulaire, dont la taille varie de 5 à 10 µm, prédomine.

Les **algues** ne constituent pas à ce jour un groupe évolutif unique mais désignent toute une série d'organismes pouvant appartenir à des groupes phylogénétiques très différents : certains organismes sont regroupés avec les plantes vertes, d'autres avec les bactéries. Ce sont des êtres vivants capables de photosynthèse dont le cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique.

Dans l'acception la plus large du terme, les algues rassemblent :

- des organismes procaryotes : les « algues bleues » ou cyanobactéries;
- des organismes eucaryotes à espèces unicellulaires ou pluricellulaires, euglénophytes, cryptophytes, haptophytes, glaucophytes, rhodophytes (algues rouges), straménopiles regroupant notamment les diatomées et les pélophytes (algues brunes) ;
- des végétaux assez proches des plantes terrestres : les « algues vertes ».

Le **règne des protistes** (du grec *protos*, premier) **n'est plus pertinent** pour la classification phylogénétique. Ce terme englobait tous les êtres vivants mobiles et unicellulaires présentant une structure eucaryote et de taille variable (1 à 200 µm) qu'il divisait généralement en deux parties : les protozoaires à affinités animales (actinopodes, infusoires, rhizoflagellés et sporozoaires) et les protophytes à affinités végétales. Le concept est désormais abandonné au profit de groupes pouvant mélanger êtres multicellulaires et unicellulaires : certains protistes

sont rattachés aux opisthocontes, d'autres à la lignée des algues brunes (straménopiles), ou à la lignée verte des algues et des plantes terrestres (chlorophytes) tandis que d'autres ont une position encore incertaine.

II.1.1.1 Principales caractéristiques des micro-organismes :

Le tableau 1 permet de comparer les caractéristiques des trois domaines du vivant : les eubactéries, les archées et les eucaryotes, tandis que seront abordées ensuite les grandes fonctions des micro-organismes. Le lecteur se réfèrera à des ouvrages récents dédiés à la microbiologie pour plus de détails.

II.1.1.2 DIVERSITE DU MONDE MICROBIEN :

Du grec « mikros » : petit et « bios » : vie : « organisme vivant » : unité biologique capable d'assurer sa survie et sa reproduction ;

Un micro-organisme est un être vivant unicellulaire de petite taille, capable de se nourrir, de respirer et de se reproduire de façon autonome. On les appelle également **les protistes**.

II.1.2 Classification :

Les microorganismes sont des êtres vivant qui ne font ni du règne animal ni du règne végétal. On les appelle les protistes.

micro organisme capable de se nourrir, de respirer et de se reproduire de façon autonome. Les micro-organismes ou protistes se divisent en 2 grandes catégories

- les micro-organisme **eucaryotes** (« caryos » : noyau; « eu » normal) ou protistes supérieurs. (type animal)
- les micro-organisme **procaryotes** (« caryos » : noyau; « pro »: rudimentaire, peu développé) ou protistes inférieurs. (type bactérie) .

Il existe deux deux grandes catégories de protistes :

Les protistes supérieurs	Algues (sauf algues bleues)
	Protozoaires
	Champignons (moisissures, levures)
Les protistes inférieurs	Algues bleues
	Bactéries

Tableau 1- catégorie des protistes

Les microorganismes se trouvent partout : dans l'aire, dans l'eau, dans nos aliments, sur notre peau, dans notre organisme...

Chapitre III

Les bactéries

III. Définition d'une bactérie :

Une bactérie est un être unicellulaire (**procaryote**) de petite taille, de morphologie variable qui présente des caractéristiques propres.

La taille d'une bactérie varie entre 1 à 10 μm . Le poids d'une bactérie est d'environ 10^{-12} g. Elle contient 70% d'eau. Rapporté au poids sec, une bactérie est constituée de protéines (55%), de lipides (10%), de lipopolysaccharides (3%), de peptidoglycane (3%), de ribosomes (40%), d'ARN (20%) et d'ADN (3%).

III.1 STRUCTURE D'UNE BACTERIE :

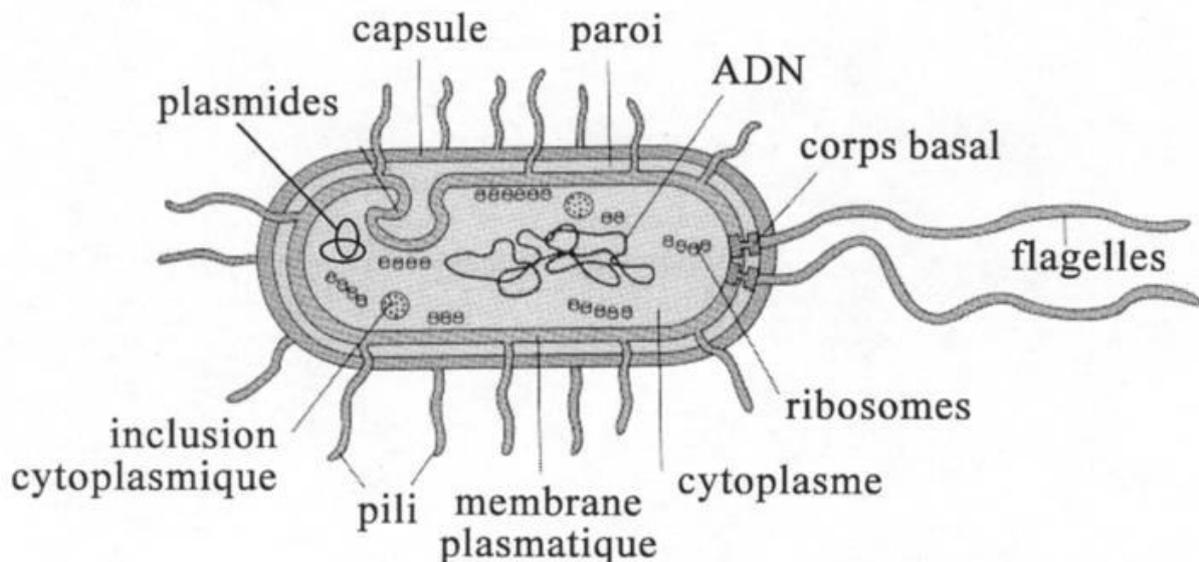


Figure 2 - structure d'une bactérie

III.2 CLASSIFICATION DES BACTERIES :

Coloration de Gram:

Permet de classer les bactéries en deux grands groupes:

1. **Gram +:** coloration violette. Paroi épaisse, de structure simple, relativement sensible aux antibiotiques
2. **Gram -:** coloration rose. Paroi moins rigide, structure plus complexe, toujours présence de pili.

III.2.1 Formes des bactéries:

Les formes des bactéries sont variées. On distingue :

- des formes rondes ou coques (*coccus* en latin, au pluriel *cocci*),
- des formes allongées en bâtonnet ou bacilles,
- des formes intermédiaires ou coccobacilles,
- des formes plus ou moins spiralées.

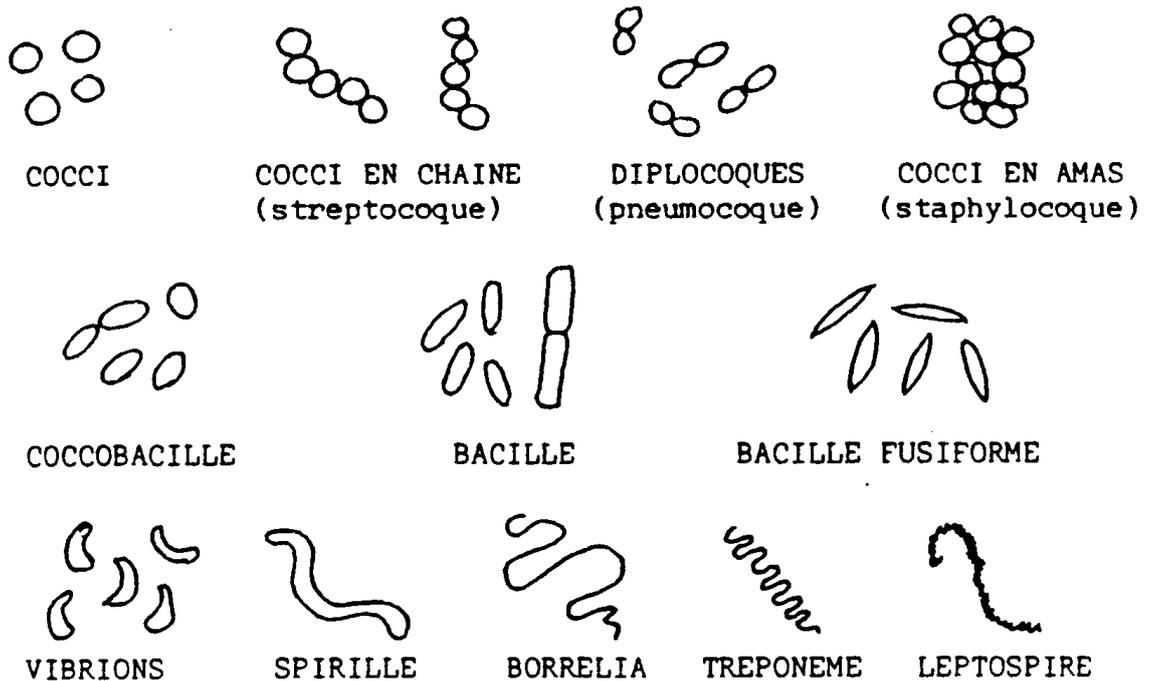


Figure 3- Les différentes formes des bactéries

L'étude au microscope de la forme des bactéries ne fournit pas de renseignements très détaillés mais présente cependant un intérêt considérable car elle constitue la première étape de toute identification bactérienne.

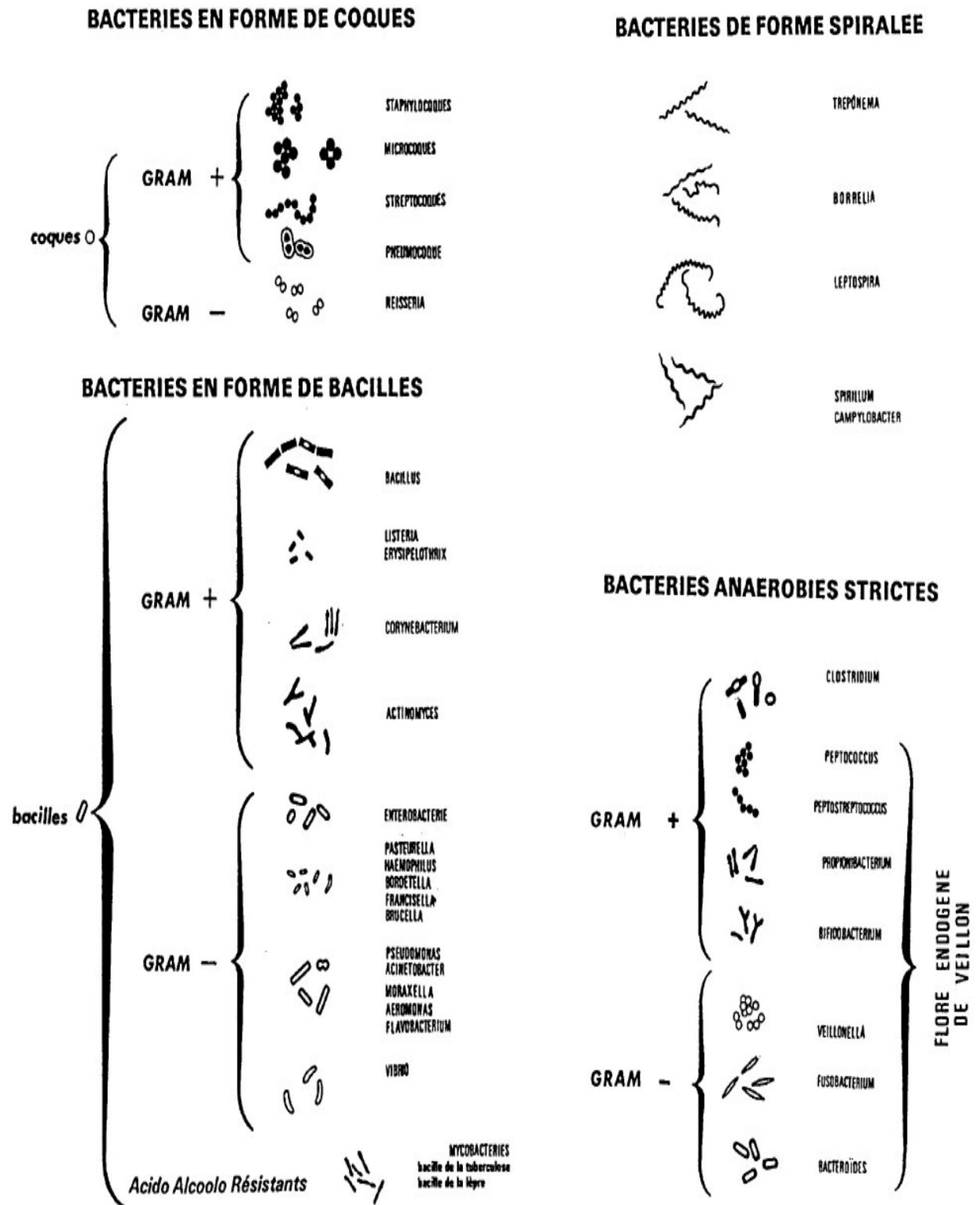


Figure 4- comportement des différentes formes au Gram+ et Gram-

III.3 Les types de bactéries :

Un très grand nombre d'espèces bactériennes est connu, elles sont réparties en trente-trois sections dans la classification de (Bergey). On note une très grande diversité des propriétés des bactéries, d'une section à une autre et à l'intérieur d'une même section ; des différences notables existent entre espèces. La figure 1, déduite de la classification de Bergey, présente les

principaux genres bactériens rencontrés dans les produits alimentaires qu'il convient de prendre en compte pour la qualité microbiologique et la maîtrise industriel de l'hygiène.

III.3.1 Selon la structure et la composition de l'enveloppe cellulaire.

La première distinction entre bactéries résulte d'une différence très importante de structure et de composition des enveloppes cellulaires, qui conduit à l'observation des bactéries au microscope après une coloration différentielle : la **coloration de Gram** qui permet de distinguer les bactéries à Gram positives (+) des bactéries à Gram négatives (-).

III.3.2 Selon la morphologie.

Le deuxième élément de distinction des bactéries consiste à considérer leur morphologie. Il existe deux types principaux de cellules : les cellules sphériques appelées coques et les cellules cylindriques appelées bacilles. Dans tous les cas, la taille des cellules est de l'ordre du micromètre pour le diamètre des coques et la largeur des bacilles, leur longueur étant de 2 à 3 µm mais pouvant les dépasser.

Selon le mode de division cellulaire, on observe au microscope des associations de cellules typiques du genre ou de l'espèce. Lors- que la division cellulaire n'a lieu que dans un seul plan, on observe, dans le cas des coques, des cellules groupées par deux, diplocoques, dans lesquels les cellules peuvent ne pas être parfaitement sphériques. Après plusieurs phases de division, l'association comprend plusieurs cellules disposées en chaîne, aspect caractéristique des streptocoques. Deux groupes de bactéries des produits naturels et alimentaires sont susceptibles de présenter cet aspect : les streptocoques fécaux, germes témoins d'une contamination fécale, et les streptocoques lactiques, utilisés pour l'obtention de produits alimentaires fermentés, notamment de produits laitiers. Les streptocoques lactiques mésophiles ont une température optimale de croissance de 30 °C. Ils appartiennent au genre *Lactococcus*, avec comme principale espèce *Lactococcus lactis*. Les streptocoques lactiques thermophiles ont une température optimale de croissance de 45 °C, avec comme espèce ***Streptococcus thermophilus***, bactérie lactique présente dans le yaourt à côté de ***Lactobacillus delbruecki-bulgaricus***. Certaines bactéries possèdent deux, voire trois plans de reproduction perpendiculaires deux à deux. Cela conduit à des amas de coques par quatre dans un plan appelés tétrades (pédiocoques) ou de huit coques disposées au sommet d'un cube. Certaines bactéries, appelées communément sarcines, rencontrées en particulier dans certaines altérations des bières, sont dans ce cas. Ces bactéries appartiennent au genre ***Pediococcus***. Les staphylocoques donnent au microscope des amas de coques irréguliers « en grappe » car ils possèdent vraisemblable- ment de nombreux plans dans lesquels la division peut s'effectuer. *Staphylococcus aureus*, bactérie pathogène des produits alimentaires responsable de toxi-infection, est dans ce cas.

Dans le cas des bactéries cylindriques, on peut observer également des détails morphologiques. Les dimensions des cellules sont plus diversifiées, du gros bacille court (1 à 2 mm sur 2 à 3 mm) au fin bacille long (0,5 à 1 mm sur 3 à 10 mm), bacille droit ou incurvé. La section 15 de la classification de Bergey regroupe des bacilles repliés ou ramifiés. Les associations de cellules sont aussi remarquables. La plus fréquente est la disposition en file de

deux cellules, **diplobacille**, ou de plus de deux, **streptobacille**. Certains bacilles sont accolés les uns aux autres dans leur longueur, association dite « en palissade » (**Corynebactéries**).

III.3.3 Selon le mode respiratoire.

Les bactéries qui ne sont capables de se reproduire qu'en présence d'oxygène sont dites **aérobies** strictes. Les bactéries capables de croître en l'absence d'oxygène sont **anaérobies**. Un assez grand nombre d'espèces peut se développer aussi bien en absence qu'en présence d'oxygène. Ces bactéries sont dites **aérobies-anaérobies facultatives**. Des bactéries importantes en technologie alimentaire sont en particulier celles qui appartiennent au genre *Clostridium*, qui ne possèdent pas l'équipement enzymatique pour réduire l'oxygène (bactéries oxydases négatives) et qui, cultivées en aérobiose, sont tuées par effet du peroxyde d'hydrogène dont elles ne peuvent pas se débarrasser, étant de surcroît catalases négatives. Ces bactéries sont dites anaérobies strictes. Ce genre regroupe un grand nombre d'espèces dont certaines sont pathogènes et peuvent être présentes dans les aliments : ***Clostridium perfringens*** et ***Clostridium botulinum***, pour n'en citer que deux. Les bactéries **micro aérophiles**, quant à elles, exigent des ambiances gazeuses particulières dans lesquelles la pression partielle d'oxygène est inférieure à ce qu'elle est dans l'air sans être nulle. L'étude du comportement vis-à-vis de l'oxygène est aussi utilisée pour la distinction des genres et espèces de bactéries Gram positives.

III.3.4 Selon le type trophique.

Les bactéries occupent des biotopes variés. De ce fait elles ont des métabolismes très différents. Les types trophiques (*trophos* = nourriture) décrivent la manière de trouver de l'énergie. Il existe 2 sources d'énergie :

- Énergie lumineuse: **phototrophie**
- Énergie chimique: **chimiotrophie**.

– **Bactéries phototrophes anoxygéniques.**

Ces bactéries tirent leur énergie de la **lumière** (phototrophes) mais sans **libérer de l'oxygène**

(*Anoxygéniques*) : (Contrairement aux plantes supérieures). Elles vivent en milieu anoxique (sans oxygène).

– **Bactéries phototrophes oxygéniques**

Elles tirent leur énergie de la **lumière** (phototrophes) avec **dégagement d'oxygène**

(*Oxygéniques*). Ce sont les cyanobactéries ou « algues bleues » (ancien nom retiré car ne sont pas des algues).

– **Bactéries chimio-lithotrophes**

Elles tirent leur énergie de **l'oxydation de molécules** (chimiotrophes) **minérales**, comme le fer, le soufre ou l'hydrogène (lithotrophes). Elles sont **autotrophes** (fixent le CO₂).

– **Bactéries chimio-organotrophes**

Elles tirent leur énergie de **l'oxydation** (chimiotrophes) de **composés organiques** (organotrophes).

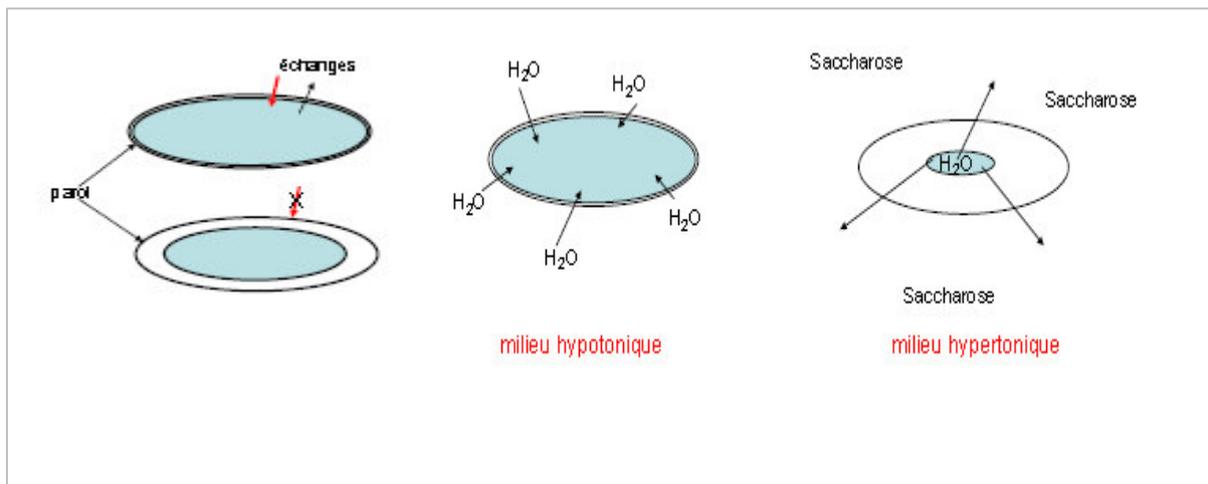
III.4 Biotope et niche écologique.

Biotope : ensemble des éléments qui caractérisent un lieu (tous les paramètres physico-chimiques). Ils déterminent les populations capables d'y résider.

Niche écologique : en plus des paramètres physico-chimiques, on tient compte des relations entre espèces et des conditions nécessaires à la survie d'une population.

III.5 Principaux paramètres physico-chimiques

Ce sont les paramètres qui caractérisent un biotope. Il s'agit de la **quantité d'eau disponible** (pression osmotique), de l'**acidité** du milieu, de la **température** ambiante, de la **pression** et de l'apport en **oxygène**.



III.5.1 Eau disponible / activité de l'eau.

Les bactéries ont besoin d'eau liquide pour vivre. Leur cellule est délimitée par une paroi rigide suivie d'une membrane cytoplasmique. La membrane plasmique est le siège de tous les échanges avec l'extérieur. Elle est **semi-perméable** (elle « trie » ce qui peut entrer dans la cellule). Pour conserver ce rôle, il est nécessaire qu'elle soit plaquée contre la paroi. Si l'eau manque, la membrane se décolle de la paroi et les échanges avec l'extérieur vont cesser. Elles doivent vivre dans un milieu hypotonique (plus dilué que le cytoplasme), de telle façon que leur membrane colle à la paroi, ce qui facilite les échanges, notamment l'introduction de nutriments (solubilisés).

Les bactéries doivent vivre avec presque 100% d'eau liquide disponible (non liée chimiquement). **L'activité de l'eau** mesure l'eau disponible dans un milieu. L'eau peut être présente, mais retenue par du sucre ou du sel. Elle n'est pas disponible. Ces milieux ont une forte pression osmotique (hypertonique). Il existe des micro-organismes qui font exception à la règle en tolérant une pression osmotique plus élevée (osmotolérants).

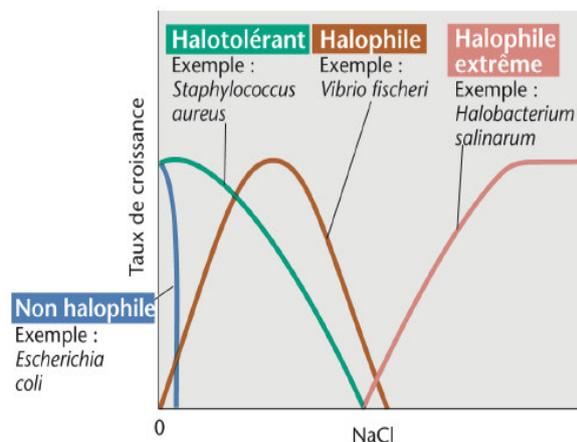
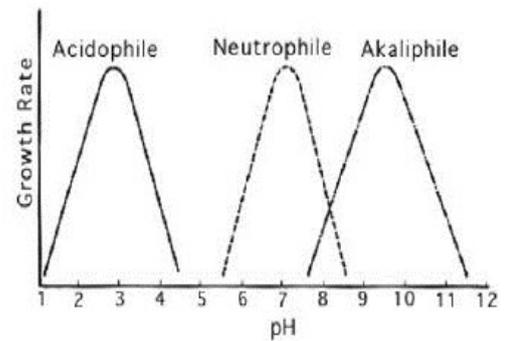


Figure 5. — Comportement des bactéries dans un milieu aqueux

Comme pour tous les paramètres physico- chimiques, il y a des bactéries qui ont subi une adaptation pour obtenir une **tolérance extrême (bactéries halophiles)**. Ces bactéries sont *des Archaea* pour la plupart. Le terme halophile est utilisé pour les milieux salés (NaCl), osmophile est utilisé pour les milieux sucrés. Les deux impliquent une pression osmotique élevée du milieu.

III.5.2 Notion de pH.

La majorité des bactéries vit à un pH proche de la neutralité (6-7), mais il existe des bactéries qui produisent de l'acide, par fermentation par exemple, et qui supportent des pH de 4-5 (ex: bactéries lactiques (yoghourt) ou acétique (vinaigre)). Elles sont **acidophiles**. D'autres vivent en milieu alcalin, elles sont alcalophiles.



Il existe beaucoup de bactéries qui vivent dans des **environnements extrêmes**. Certaines sont adaptées à des pH alcalin (10- 11), par ex. dans des lacs alcalins en Afrique. Elles sont **alcalophiles**. D'autres vivent dans des environnements très acides, en général volcaniques (présence d'acide sulfurique) (pH 1). Elles sont **acidophiles extrêmes**.

III.5.3 Température.

Classes	Temps	Particularité	Exemples/habitat
Psychrophiles	5-15°C	Se développent bien à 0°C Adaptation des enzymes et de la membrane plasmique	Océans
Psychrophiles facultatifs	20-30°C	Peuvent se développer à 0°C	Danger pour la nourriture réfrigérée
Mésophiles	20-45°C	Minimum 15-20°C	Bactéries de l'environnement, pathogènes
Thermophiles	55-65°C	Minimum autour de 45°C	Compost, foin bactéries lactiques
Thermophiles extrêmes	100°C et plus	Adaptation des enzymes, protéines, ADN, membrane plasmique	Fonds océaniques, environnements géothermiques

Tableau 2: classes des bactéries en fonction de leur résistance à la température

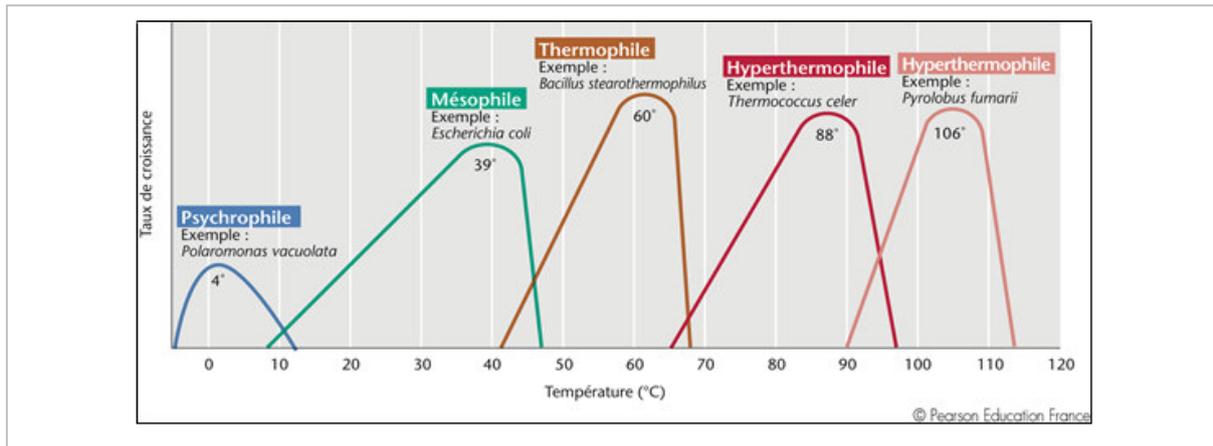


Figure 6: taux de croissance des bactéries en fonction de la température

III.5.4 Pression.

La pression peut atteindre 1000 atmosphères dans les zones les plus profondes des océans (11.000 m de profondeur).

Unités de pression

1 atmosphère (pression atmosphérique au niveau de la mer) est équivalente à :

1(atm) = 1,01325 (bar)

1(atm) = 1013,25 (hPa)

1(hPa) = hectopascal = 100 (Pa)

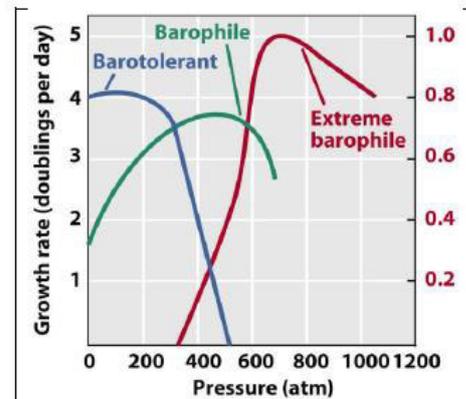


Figure 7: influence de la pression sur les bactéries

III.5.5 Présence ou absence d'oxygène.

Aérobies obligatoires ou aérobies stricts	ont absolument besoin d'oxygène, mais en quantités variables en métabolisme oxydatif	contact avec l'air obligatoire: <i>Bacillus subtilis</i> peut se développer dans un milieu liquide O ₂ dissous:
Microaérophiles	ont absolument besoin d'oxygène, mais en très faible quantité ne supportent pas la tension d'O ₂ de l'air	ex.: bactéries intestinales comme <i>Campylobacter</i>
Anaérobies facultatifs	ne sont pas absolument dépendants de l'oxygène peuvent vivre sans O ₂ en présence d'un sucre à n'utilisent pas l'oxygène	ex.: <i>Escherichia coli</i>
Anaérobies aérotolestants	mais peuvent le tolérer dans une certaine mesure	bactéries + ou - dépourvues de mécanismes de défense contre les effets

Anaérobies obligatoires ou anaérobies strictes	oxygène toxique, ne se développent qu'en absence d'O ₂ fermentation ou respiration anaérobie	<i>Clostridium</i> <i>Bacteroides</i>
---	--	--

Tableau 3: classification des bactéries en fonction de la présence ou l'absence d'oxygène

Le métabolisme entraîne des oxydations. En présence d'oxygène, des radicaux oxydants toxiques sont produits. Les bactéries aérobies ont les moyens de neutraliser ces radicaux.

III.6 Culture des bactéries :

Les procédés de cultures bactériennes sont très nombreux, utilisant soit des milieux liquides, soit des milieux solidifiés par un gel agar-agar (milieux gélosés). Certaines espèces de bactéries (intracellulaire obligatoire) ne se cultivent que sur des cultures de cellules eucaryotes.

III.7 METABOLISME ET CROISSANCE en milieu non renouvelé:

Lorsqu'une cellule bactérienne est placée dans un milieu convenable qui assure ses besoins nutritifs, elle va accroître sa masse et se multiplier en se divisant en deux. Leur multiplication se fait par **fission binaire** (une bactérie donne deux bactéries filles), d'où une **multiplication exponentielle**. Le temps de génération varie de 20 min. à 24 h ou plus, selon l'espèce considérée. La croissance est inhibée par le manque de nutriment dans le milieu, les déchets métaboliques que les bactéries produisent et dans le corps humain par le système immunitaire.

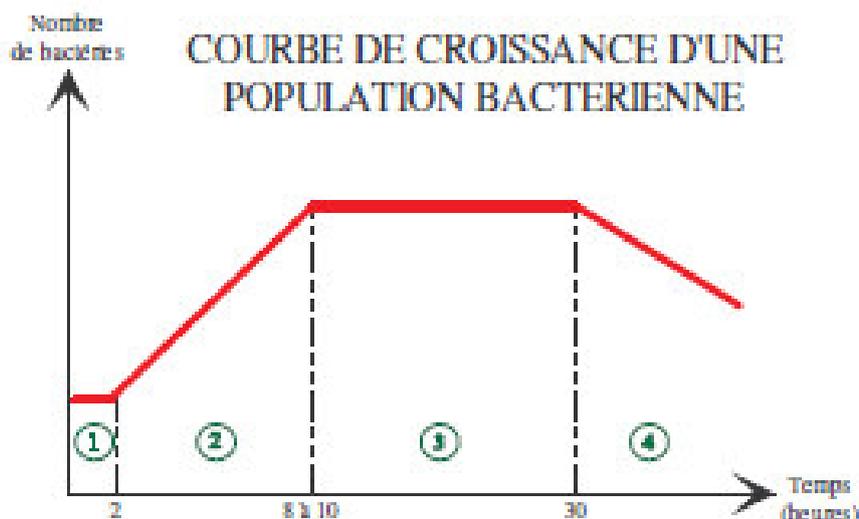


Figure 8-Courbe de croissance bactérienne

<i>Phase 1</i>	<i>La population bactérienne reconnaît le milieu et développe les enzymes nécessaires à l'utilisation des nutriments</i>
<i>Phase 2</i>	<i>Les bactéries utilisent les éléments nutritifs du milieu et se reproduisent et la phase est stoppée une fois les nutriments épuisés</i>
<i>Phase 3</i>	<i>Les bactéries sont vivantes et peuvent synthétiser des toxines et être en activité</i>
<i>Phase 4</i>	<i>Le manque de nourriture et les déchets qui s'accumulent provoquent la mort des bactéries</i>

Tableau 4- phases d'une population bactérienne.

Selon les conditions d'environnement, une bactérie peut se trouver sous deux états principaux: **l'état végétatif** ou de croissance, et **l'état de repos** où elle fait un minimum d'échange avec l'extérieur, qui lui permettent de rester vivante mais sans croissance.

Certaines bactéries des genres *Bacillus* et *Clostridium* (bacilles Gram positif) sont capables, quand les conditions du milieu deviennent défavorables (carence en C, N ou P), de développer une forme dormante extrêmement résistante: la **spore**. C'est une forme déshydratée de la bactérie très résistante (UV, chaleur, désinfectants...) dont l'activité métabolique est nulle. A l'inverse des spores des champignons et des plantes (dont le but est la dissémination), leur fonction est uniquement de survivre dans des conditions très défavorables.

Pour leur croissance, les bactéries ont besoin de nutritifs:

- aliments énergétiques: substrat oxydant (oxygène, nitrate, sulfate, composés organiques, lumière...)
- aliment constitutifs: eau, source de carbone (matière organiques ou CO₂) et d'azote (ammoniaque, dérivé azoté organique), ions minéraux.
- parfois des aliments spécifiques.

La température est un facteur important dans la croissance des bactéries. Selon l'espèce de bactéries, la vitesse de croissance peut varier en fonction de la température. Les bactéries pathogènes sont généralement mésophiles.

III.8 Provenance des bactéries utilisée en biomine :

Les bactéries en générale sont prélevées sur le site des mines des eaux naturelles de la région ou des eaux de drainage, comme on utilise aussi des boues activée adaptés au minerai à extraire.

III.9 Boue activée :

Les boues activées sont utilisées comme épuration biologique dans le traitement des eaux usées. La boue activée, composée essentiellement de micro-organismes floculants, est mélangée avec de l'oxygène dissous et de l'eau usée. C'est ainsi que les micro-organismes de la boue activée

entrent constamment en contact avec les polluants organiques des eaux résiduaires, ainsi qu'avec l'oxygène, et sont maintenus en suspension.

III.10 Eaux de Drainage minier :

Les eaux de drainage minier présentent une grande diversité de compositions et de propriétés chimiques qui vont provoquer des impacts environnementaux variés en importance et toxicité.

On peut répartir ces eaux en trois ensembles principaux :

- eaux salines issues des divers gisements de sel
- eaux acides à métaux lourds, sulfatées, dérivées de l'oxydation des sulfures
- eaux alcalines à hydrogène sulfuré, pauvres en métaux lourds et issues de la réduction des sulfates.

III.10.1 Les eaux acides :

Les eaux de drainage minier marquées par une forte acidité (Ph voisin de 3) sont en moyenne les plus fréquentes et les plus agressives pour l'environnement. Elles entraînent en aval l'oxydation et la dénudation des sols et sédiments et menacent flore et faune.

Le caractère acide provient de l'existence au sein de minerais de sulfures oxydés par contact avec l'air humide lors des extractions, traitements et stockage. Cette oxydation est fortement favorisée par l'activité des bactéries à rôle catalyseur et acidificateur prononcé, comme *Thiobacillus Ferrooxydans*. Les facteurs essentiels responsables de cette acidification sont un Ph initial bas, une température suffisante, une teneur significative en oxygène dissous de l'air et l'eau... Des facteurs additionnels concernent la favorisation de l'activité bactérienne.

Bactérie	Température °C (optimum)	pH (optimum)	Croissance par oxydation de :	Source de carbone	Acepteur final d'électrons	Taille	Aérobicité
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	2 - 40 (30 - 32)	1,0 - 5,0 (1,8)	Fe ²⁺ , MeS S ⁰ , S ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻	CO ₂	Oxygène (Fe(III) en anaerobiose)	0,5µm Ø 1,5µm long	+ (anaerobe facultatif)
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	2 - 40 (30 - 32)	0,5 - 5,0 (1,8)	S ⁰ , S ²⁻ S ₂ O ₃ ²⁻	CO ₂	Oxygène	0,5µm Ø 1,5µm long	++
<i>Thiobacillus thioparus</i>	23 - 35	4,5 - 7,8 (7,0)	S ⁰ , S ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , thiocyanate	CO ₂	Oxygène NO ₃ ⁻ en anaerobiose	0,5µm Ø 3,0µm long	+ - (anaerobe facultatif)
<i>Thiobacillus acidophilus</i>	20 - 37 (25 - 30)	1,5 - 6,0 (6,0)	S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	CO ₂ C _{organique}	Oxygène	0,5µm Ø 1,5µm long	+
<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	23 - 37	4,5 - 7,8 (7,0)	S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	CO ₂	Oxygène	0,5µm Ø 1,5µm long	+
<i>Thiobacillus novellus</i>	20 - 40	5 - 9,5 (7,0)	S ₂ O ₃ ²⁻ , composés organiques	CO ₂	Oxygène	0,8µm Ø 2,0µm long	++
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	2 - 40 (30 - 35)	1,5 - 5,0 (2,5)	Fe ²⁺ , FeS ₂	CO ₂	Oxygène	0,2 - 0,8µm Ø 0,9 - 1,1µm long polymorphisme, souvent en spirale	++
<i>Sulfobacillus thermo-sulfidooxidans</i>	30 - 58 (45 - 49)	1,7 - 4,5 (2,1 - 2,5)	Fe ²⁺ , S ⁰ , MeS	CO ₂ C _{organique}	Oxygène	0,6 - 0,8µm Ø 1,0 - 3,0µm long polymorphisme	+
Souche TH1/BC1	? - 60 (50)	1,1 - 3,5 (2,6)	Fe ²⁺ , S ⁰ , MeS	CO ₂ C _{organique}	Oxygène	0,8µm Ø 1,6 à 6,0µm long en fonction du substrat	+
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	20 - 40	6,0 - 8,0	S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻ , dithionite, tetrathionate	CO ₂	Oxygène (NO ₃ ⁻ en anaerobiose)	0,5µm Ø 2,0µm long	+ - (anaerobe facultatif)
<i>Metallogenium</i>	20 - 40	3,5 - 6,8	Fe ²⁺ , Mn	CO ₂	Oxygène	?	?
<i>Thermoplasma acidophilia</i>	37 - 65	0,5 - 4,3	S ⁰ , composés organiques	C _{organique} (CO ₂)	Oxygène	?	+
<i>Thiobacillus thermo-sulfidooxidans</i>	37 - 55	1,5 - 5,0	Fe ²⁺ , S ⁰ , MeS, composés organiques	CO ₂	Oxygène	0,5µm Ø 2,0µm long	+
<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	55 - 85 (70 - 75)	0,9 - 5,9 (2,0 - 3,0)	Fe ²⁺ , MeS, S ⁰ , S ²⁻	CO ₂ C _{organique}	Oxygène (Fe(III) en anaerobiose)	0,7 à 1,5µm sphériques	+ (anaerobe facultatif)
<i>Sulfolobus brierleyi</i>	45 - 75 (70)	1,5 - 7,0 (1,5 - 2,0)	Fe ²⁺ , MeS, S ⁰ , S ²⁻	CO ₂ C _{organique}	Oxygène (Mo en anaerobiose)	0,7 à 1,5µm sphériques	+ (anaerobe facultatif)
<i>Sulfolobus sulfataricus</i>	50 - 89 (70 - 75)	1,0 - 5,5 (3,5 - 5,0)	S ⁰ S ²⁻	CO ₂ C _{organique}	Oxygène	0,7 à 1,5µm sphériques	+ (anaerobe facultatif)

Tableau 5- Caractéristiques des principales bactéries acidophiles oxydatrices du fer et du soufre

(sources: Norris, 1990, Ritcey, 1989, Pivovarova et Golovacheva, 1985).

Chapitre IV

Impact de l'activité minière sur l'environnement

IV. Impact des résidus miniers sur l'environnement :

L'extraction de matériaux et minerais par carrières et mines a amené l'augmentation de la perméabilité en grand des roches, à stocker en surface des produits décompactés et exposés aux précipitations, et donc à augmenter fortement la percolation et le drainage des eaux.

Le risque apporté par ces eaux est très divers. Il dépend de la composition de ces eaux mais aussi de la nature des roches et sols traversés, avec des réactions et des piégeages géochimiques qui peuvent avoir beaucoup d'influence. Par exemple des eaux drainant certaines mines de plomb peuvent être parfaitement potables alors que certaines eaux issues de zones à minerais de Cu, Zn, Sn ou charbon présentent une acidité et/ou une toxicité marquée.

Dans certaines régions la contamination des sédiments par les eaux de drainage minier peut remonter à plusieurs milliers d'années: le Río Tinto transporte dans le golfe de Cadix des métaux polluants (Cu, Fe, Pb, Zn, Ti, Ba, Cr, V, Co) issus d'exploitations de plus en plus étendues depuis l'âge du cuivre puis du bronze.

En Sardaigne les mines de Pb-Zn de Masua (calcaires cambriens) et Montevecchio (épontes de granite) donnent depuis 100 ans des boues résiduelles chargées en métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Cu) dont les eaux de drainage très acides (pH voisin de 3) et oxydantes contaminent en aval les sédiments et sols de la vallée de Montevecchio.

Dans la vallée de Coeur d'Alène au nord de l'Idaho (USA) l'exploitation depuis 1884 d'argent (31000t) , plomb (> 8000Mt) et zinc (> 3000 Mt) a provoqué l'accumulation sédimentaire, dans 11 lacs bordant en aval le cours d'eau, de proportions importantes de Pb (3,8%), Zn (3,4%), As (340mg/kg), Cd (120 mg/kg) et Hg (7 mg/kg). Ces divers métaux continuent à être apportés lors des crues, en dépit de la fermeture déjà ancienne des exploitations.

IV.1 Impacts ENVIRONNEMENTAUX et sociaux de l'exploitation minière

IV.1.1 Impacts sur les ressources en eau

Les effets sur la qualité de l'eau et de la disponibilité des ressources en eau dans la zone du projet constituent peut-être l'impact le plus important d'un projet d'exploitation minière. Les questions clés sont de savoir si les fournitures en eau de surface et en eaux souterraines resteront appropriées à la consommation humaine, et si la qualité des eaux de surface dans la zone du projet restera adéquate pour supporter la vie aquatique et la faune terrestre native.

IV.2 Le drainage d'acide minier et la lixiviation des contaminants

La capacité de drainage de l'acide minier est une question-clé. La réponse déterminera si un projet minier proposé est acceptable pour l'environnement. Lorsque des matériaux minés (tels que les parois des mines à ciel ouvert et des mines souterraines, les résidus, les déchets rocheux et les matériaux lessivés déversés) sont excavés, exposés à l'eau et à l'oxygène, des acides peuvent se former si les minéraux sulfurés de fer (en particulier la pyrite, ou 'l'or des idiots') sont abondants et si il y a une quantité insuffisante de matériaux neutralisants pour contrebalancer la formation d'acide.

L'acide, à son tour, lessivera ou dissoudra les métaux et autres contaminants dans les matériaux minés et formera alors une solution acide, à forte teneur en sulfate et riche en métal (y compris les concentrations élevées de cadmium, de cuivre, de plomb, de zinc, d'arsenic, etc.).

Le lessivage des constituants toxiques, tels que l'arsenic, le sélénium et les métaux, peut se produire même si les conditions acides ne sont pas présentes. Des niveaux élevés de composés d'azote et de cyanure (ammoniac, nitrate, nitrite) peuvent également être trouvés dans les eaux des sites miniers, en provenance de la lixiviation en tas et des produits d'abattage par explosifs. Le drainage des acides et des contaminants de lixiviation est la plus importante source d'impacts sur la qualité de l'eau liés à l'extraction des minerais métalliques.

IV.3 Impacts des projets miniers sur la qualité du sol

L'exploitation minière peut contaminer les sols sur de vastes zones. Les activités agricoles proches d'un projet d'exploitation minière peuvent être particulièrement touchées. Selon une étude commanditée par la Communauté européenne:

“Les opérations minières modifient régulièrement le paysage environnant en exposant des sols qui étaient précédemment intacts. L'érosion des sols exposés, les minerais extraits, les terrils et les matériaux fins dans les tas de déchets de roches peuvent entraîner des charges substantielles de sédiments dans les eaux de surface et les voies de drainage des eaux. En outre, les déversements et fuites de matières dangereuses et les dépôts de poussières contaminées fouettées par le vent peuvent conduire à la contamination du sol.

“CONTAMINATION DU SOL: Les risques sur la santé humaine et sur l'environnement provenant de sols appartiennent généralement à deux catégories:

(1) sol contaminé provenant des poussières fouettés par le vent et (2) les sols contaminés à partir de déversements de produits chimiques et de résidus. La poussière fugitive peut poser des problèmes environnementaux significatifs dans certaines mines. La toxicité inhérente de la poussière dépend de la proximité des récepteurs environnementaux et du type de minerai

exploité. Des niveaux élevés d'arsenic, de plomb et de radionucléides dans la poussière fouettée par le vent constituent généralement le plus grand risque. Les sols contaminés à partir de déversements de produits chimiques et des résidus sur les sites de la mine peuvent poser un risque de contact direct lorsque ces matériaux sont utilisés abusivement comme matériaux de remblayage, pour la création de zones vertes ornementales ou encore comme suppléments de sol."

IV.4 LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX AUX POTENTIELS :

Certains des résidus ou déchets provenant de l'exploitation minière peuvent, de par la masse qu'ils représentent ou de par leur nature chimique (ou physique), porter atteinte à différents éléments de l'environnement, en particulier l'eau les sols, les paysage, la végétation, et le système écologique. Comme nous aurons besoin de faire référence

IV.5 ADSORPTION ET DESORPTION :

IV.5.1 Adsorption :

L'adsorption, à ne pas confondre avec l'absorption, est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides des adsorbants. Les molécules ainsi adsorbées constituant l'adsorbat. Si les conditions énergétiques ou cinétiques permettent à la molécule de pénétrer au sein de la phase adsorbante, il y a absorption.

L'adsorption repose sur la propriété qu'ont les surfaces solides de fixer certaines molécules de manière réversible, par des liaisons faibles de type Van der Waals. Cette propriété est liée à la structure même du solide où subsistent, en surface, des forces non équilibrées par suite des dissymétries dans la répartition des atomes : la formation d'une couche de molécules adsorbées compense en partie ce déséquilibre.

IV.5.2 Désorption :

La désorption est le phénomène inverse de l'adsorption : les liaisons ioniques entre ions, molécules et substrat se brisent et les ions ou molécules précédemment adsorbées se détachent du substrat.

Chapitre V

Généralité sur l'argent

V. Généralité sur l'Argent :

L'argent est un métal précieux blanc argenté brillant que l'on trouve à l'état natif dans les mines argentifères, mais il accompagne le plus souvent le plomb, le zinc ou le cuivre dans des minerais de type sulfures et parfois il se trouve en association avec l'or natif.

V.1 Propriétés :

Informations générales	
Nom (fr), symbole, numéro	Argent, Ag, 47
Série chimique	métaux de transition
Groupe, période, bloc	11, 5, d
Masse volumique	10,50 g·cm ⁻³ (20 °C)
Dureté	3.25 mohs
Couleur	Blanc argenté métallique
Nombre de neurtons	61
Propriétés atomiques	
Masse atomique	107,8682
Rayon atomique	160 pm
Rayon de covalence	145 ± 5 pm
Rayon de van der Waals	172 pm
Configuration électronique	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹
Volume atomique	10.3 cm ³ /mol
Structure cristalline	Cubique à faces centrées
Propriétés physiques	
État ordinaire	Solide
Point de fusion	961.93 C (1235.1 K)
Point d'ébullition	2212 C (2428 K)
Energie de la 1ère ionisation	731 kJ/mole
Energie de la 2ème ionisation	2073.5 kJ/mole
Energie de la 3ème ionisation	3360.6 kJ/mole
Conductivité thermique	429 J/m-sec-degC
Conductivité électrique	630.5 1/mohm-cm
Résistivité électrique	1.467 X 10-8 ohms-m (OoC)

Tableau 6- quelques propriétés de l'Argent (Ag).

V.2 Abondance :

L'argent est par importance le 68ème élément constituant de l'écorce terrestre; celle-ci en contient 7,5.10⁻⁶ % jusqu'à une profondeur de 16 km. On rencontre l'argent aussi bien à l'état natif (sous forme de métal) que dans des composés. Estimé en 2010, il y aurait un stock de 270 000 à 380 000 tonnes d'argent sur Terre. avec une consommation actuelle de l'ordre de 20 000

t/an, la pénurie nous guette d'ici 2030 ! Toutefois près du quart de cette consommation vient du recyclage.

Il existe aussi dans l'eau de mer à une concentration correspondant sensiblement à la solubilité du chlorure (10^{-5} g/l), et on l'a signalé dans les pierres météoriques.

Les minéraux les plus importants sont :

- l'argentite : Ag_2S
- la bromargyrite ou la bromite : AgBr
- la chlorargyrite ou l'argent corné : AgCl
- la dyscrasite : Ag_3Sb
- la fischessérite : Ag_3AuSe_2
- la hessite : Ag_2Te
- l'iodargyrite : AgI
- la miargyrite : AgSbS_2
- la naumannite : Ag_2Se
- la petzite : Ag_3AuTe_3
- la proustite : Ag_3AsS_3
- la pyrargyrite ou l'antimonite d'argent : Ag_3SbS_3
- la stéphanite : Ag_5SbS_4
- la stromeyérite : AgCuS

L'argent apparaît également (la plupart du temps dans de petites quantités) dans les minerais dont on extrait l'or, le plomb, le cuivre et le zinc.

V.3 Applications industrielles de l'argent et de ses sels:

La ductilité, la conductivité et la malléabilité sont les qualités physiques de l'argent de plus en plus sollicitées avec la miniaturisation de l'électronique. Les principaux usages de l'argent concernent :

- l'électronique en tant que conducteur (téléphones mobiles, ordinateurs, équipements électroniques, cellules solaires, etc.) ;
- les usages bactéricides (nanotechnologies, industrie du textile, pansements, produits à usages médicaux, purificateurs d'eau, etc.) ;
- l'équipement chimique, car il résiste particulièrement bien à l'action des bases, des sels alcalins et de beaucoup d'acides minéraux ;
- la fabrication de miroirs par évaporation thermique ;
- son rôle de catalyseur dans un certain nombre de réactions dont la plus importante est la combustion du monoxyde de carbone.

Dans les alliages d'argent, par addition d'un métal étranger, on cherche à remédier aux deux défauts principaux de l'argent : le manque de dureté et la réactivité vis-à-vis du soufre et des sulfures.

L'accroissement de la résistance mécanique est généralement obtenu par addition de cuivre. Les principaux alliages sont les alliages d'orfèvrerie à 7,5 p. 100 et 10 p. 100 de cuivre. Ils sont également utilisés dans l'industrie électrique, car la conductivité de l'argent est peu altérée. L'accroissement de la résistance vis-à-vis du soufre et des sulfures est obtenu par addition de cadmium, de zinc ou d'antimoine, mais la couleur de l'argent est presque toujours altérée.

Les alliages ternaires, notamment argent-cuivre-zinc, sont utilisés pour la brasure et leur importance ne cesse de croître, car leur emploi est très général. Les alliages avec l'or et les métaux précieux (palladium, platine) sont employés en orfèvrerie et dans l'art dentaire. Enfin, il existe de très nombreux pseudo-alliages (cermets) avec des composés minéraux.

Le plus important de tous les sels d'argent est le nitrate, qui est utilisé pour la préparation de tous les autres sels. Ses principaux débouchés sont :

- la fabrication réduite mais encore présente des émulsions photographiques ;
- la fabrication des miroirs (argenteure chimique) ;
- la fabrication d'encres indélébiles, de teintures ;
- les applications médicales (solutions ophtalmologiques, crayons de nitrate d'argent).

C'est aussi un réactif analytique très important.

V.4 Toxicité et impact écologique et environnemental de l'Argent :

V.4.1 Toxicité :

L'argent est aussi un polluant et un contaminant. Il est très toxique pour les bactéries, les champignons et de nombreux organismes à sang froid. L'argent est extrêmement toxique pour les larves de mollusques alors que les adultes peuvent le bioaccumuler en quantité plus importante.

V.4.2 Effets de l'argent sur la santé :

Les sels argentés solubles, particulièrement AgNO_3 , sont mortels avec des concentrations allant jusqu'à 2g (0,070 onces). Les composés d'argent peuvent être lentement absorbés par les tissus de corps, avec comme conséquence une pigmentation bleuâtre ou noirâtre de la peau (argiria).

Contact avec l'œil: peut causer des dommages cornéens graves si le liquide rentre en contact avec les yeux. Contact avec la peau: peut causer l'irritation de peau. Le contact répété et prolongé avec la peau peut causer la dermatite allergique. Risques d'inhalation: l'exposition aux concentrations élevées des vapeurs peut causer le vertige, la difficulté de respiration, les maux de tête ou l'irritation respiratoire. Les concentrations extrêmement élevées peuvent causer la somnolence, confusion, la perte de connaissance, le coma ou la mort.

Organe de cible: la surexposition chronique à un composant ou à des composants de ce matériel s'est avérée causer les effets suivants chez les animaux de laboratoire:

- dommages de rein.
- dommages d'œil.
- dommages de poumon.
- dommages de foie.
- anémie.
- dommages de cerveau.

La surexposition chronique à un composant ou à des composants dans ce produit a été suggérée comme cause des effets suivants chez l'homme:

- anomalies cardiaques.
- la surexposition répétée et prolongée aux dissolvants endommage de manière permanente le cerveau et le système nerveux.
- le contact répété par inhalation ou par la peau de la cétone éthylique méthylique peut augmenter le pouvoir des neurotoxines telles que l'hexane si les expositions se produisent en même temps.

V.4.3 Effet de l'Argent sur l'environnement et l'écosystème :

V.4.3.1 Sur l'environnement :

Les émissions provenant des opérations de fusion, la fabrication et l'élimination de certaines fournitures photographiques et électriques, la combustion du charbon, et de l'ensemencement des nuages sont quelques-unes des sources anthropiques d'argent dans la biosphère (Eisler, 1997). Les retombées de l'ensemencement des nuages avec de l'iodure d'argent (AgI) ne sont

pas toujours confinée à des précipitations locales ; des résidus d'argent ont été détectés plusieurs centaines de kilomètres en aval des événements ensementement (Freeman, 1979).

En 1978, la perte d'argent dans l'environnement est estimée aux Etats-Unis était 2.500.000 kg, principalement vers les écosystèmes terrestres et aquatiques ; l'industrie photographique représente à elle seule environ 47% de tout l'argent déversé dans l'environnement à partir de sources anthropiques (Smith & Carson, 1977). Purcell et Peters (1998) ont cité un rapport de chaland et al. (1981) qui a déclaré que la perte d'argent dans l'environnement est estimée aux Etats-Unis en 1978 variait de 2,4 à 2.500.000 kilogrammes. 29% a été libéré pour le milieu aquatique, tandis que 68% a été libéré à la terre comme des déchets solides. Il a été signalé que 30% de la libération totale provient de sources naturelles et 30% des pays en développement et la production photographique. En 1999, les rejets dans l'environnement aux Etats-Unis par l'intermédiaire d'émissions, les rejets et l'élimination des déchets des sites répertoriés dans l'Inventaire des rejets toxiques étaient estimée à 270 000 kg pour l'argent et 1,7 million de kilogrammes pour les composés de l'argent. Les rejets dans le sol se sont élevés à 90% pour les composés de l'argent et 40% pour l'argent, alors que près de 60% de l'élimination des déchets d'argent de presse s'est fait hors site (TRI, 1999).

La plupart de l'argent perdu dans l'environnement entre dans les écosystèmes terrestres, où il est immobilisé sous la forme de minéraux, de métaux ou alliages; les terres agricoles peuvent recevoir jusqu'à 80 000 kg d'argent par année à partir de pellicules photographiques déchets dans les boues d'épuration. On estime à 150 000 kg d'argent pénètrent dans l'environnement aquatique chaque année généré de l'industrie photographique, les résidus miniers, et de la galvanoplastie (Smith & Carson, 1977). L'atmosphère reçoit 300 000 kg d'argent chaque année à partir d'une variété de sources.

V.4.3.2 Distribution ; transformation et transport dans l'environnement :

Les mouvements biogéochimiques mondiaux d'argent sont caractérisés par des rejets dans l'atmosphère, l'eau, et la terre par des sources naturelles et anthropiques, le transport à longue distance des particules fines dans l'atmosphère, le dépôt humide et sec, et sorption sur les sols et les sédiments (ATSDR, 1990). La principale source de contamination de l'eau est l'argent complexes de thiosulfate d'argent présent dans les solutions de développement photographique que les « photofinishers » rejettent directement dans les égouts (Smith & Carson, 1977). Le traitement des déchets secondaire convertit plus du complexe de thiosulfate d'argent insoluble, sulfure d'argent et une certaine forme d'argent métallique (Lytle, 1984). Environ 95% de la quantité totale d'argent est retiré dans les travaux publics de traitement des entrées contenant des eaux usées municipales et des effluents de traitement photographique commerciales, et les effluents contiennent moins de 0,07 pg / litre d'argent ionique. L'argent dans les effluents des usines de traitement des eaux usées peut être associé à des particules en suspension ou être présent aussi en complexe thiosulfate, complexe de l'argent colloïdal, colloïdale chlorure d'argent (AgCl), le sulfure d'argent, ou des complexes organiques solubles (Smith & Carson, 1977). L'Argent sur les matières en suspension et dans des formes colloïdales et des sels insolubles s'installe finalement dans les sédiments. A la station de traitement d'eau, la plupart de l'argent est précipité après traitement avec de la chaux ou adsorbé après traitement avec de l'alun flocculant. La chloration transforme une partie de l'argent de chlorure d'argent ou un complexe de chlorure d'argent soluble (Smith & Carson, 1977). La biodégradation aérobie des eaux usées d'un traitement photographique contenant 1,85 mg/litre d'argent total n'a pas nui au

processus de boues activées (Pavlostathis & Maeng, 1998). Pratiquement tout l'argent est devenu associé avec les solides de la boue à 1840 mg d'argent / kg liquide mixte solides en suspension. Quand la boue fraîche et les solides de la boue aérobie digérés ont été soumis à des procédures de lixiviation, la concentration d'argent résultant était au moins 40 fois inférieure à la limite réglementaire de 5 mg / litre (Pavlostathis & Maeng, 1998).

V.4.3.3 En milieux aquatique :

En général, l'ion d'argent est moins toxique pour les organismes aquatiques d'eau douce dans des conditions de faible concentration en solution des ions d'argent et l'augmentation du pH de l'eau, la dureté, les sulfures, et des charges organiques dissous et de particules; dans des conditions d'essais statiques par rapport aux schémas accreditives; et quand les animaux étaient bien nourries au lieu d'être affamé (Erickson et al., 1998; de Bury et al, 1999a, 1999c;.. Karen et al, 1999; Ratte, 1999; Wood et al., 1999). Il est maintenant convenu que des concentrations croissantes de carbone organique dissous permet les effets protecteurs les plus élevés (Berry et al., 1999; Karen et al., 1999). Parmi toutes les espèces étudiées, les individus les plus sensibles à l'argent étaient les mal nourris et les jeunes et ceux qui sont exposés à une faible salinité de l'eau (Smith & Carson, 1977; US EPA, 1980;. LeBlanc et al, 1984;. Erickson et al, 1998; Shaw et al., 1998). Dans le cas de l'eau de mer acclimatée truite arc, la mortalité induite par l'argent était supérieure à des salinités supérieures, mais la toxicité qui augmente avec la salinité a été liée à une capacité de hypo-osmorégulateur incomplètes et non à une augmentation d'une espèce AgCln plus toxiques (Ferguson et Hogstrand , 1998). les sédiments chimiques peuvent influencer sur la toxicité de l'argent pour les amphipodes marins (*Ampelisca abdita*) exposés pendant 10 jours à des sédiments complétées avec différentes concentrations d'argent (Berry et al., 1999). En général, les sédiments avec un excès d'acide volatile sulfure par rapport à extraire simultanément métal étaient généralement pas toxiques pour les amphipodes marins. Sédiments avec un excès d'extrait simultanément métal par rapport au sulfure acide volatile, et aucun sulfure d'acide volatile mesurables, sont généralement toxiques. Les sédiments avec le sulfure d'acide volatile mesurables ne sont pas toxiques (Berry et al., 1999).

V.4.3.4 Sur les microorganismes :

Les ions d'argent sont très toxiques pour les microorganismes (Ratte, 1999). Cependant, il n'a généralement pas d'effet inhibiteur fort sur l'activité microbienne dans les usines de traitement des eaux usées (NAPM, 1974;. Bard et al, 1976) en raison de la biodisponibilité réduite en raison de la complexation rapide et l'adsorption. Dans les eaux usées photographiques, l'argent est présent sous forme d'un complexe de thiosulfate, qui se transforme en boue de sulfure insoluble d'argent. Ni le thiosulfate d'argent ni sulfure d'argent présente les mêmes que les effets inhibiteurs des ions argent libres (NAPM, 1974;. Bard et al, 1976; Pavlostathis & Maeng, 1998). Le traitement photographique des eaux usées n'a pas inhibé la boue respiration lorsque l'argent est présent dans des concentrations allant jusqu'à 100 mg / litre, mais une concentration de 10 mg / litre présent sous forme d'ions argent libres provoque jusqu'à 84% d'inhibition de la respiration (Leonhardt et Pfeiffer, 1985). Pavlostathis & Maeng (2000) ont constaté aucun effet significatif de l'argent sur le processus de digestion anaérobie. Ils ont trouvé aucune différence significative entre la biodégradabilité ultime des déchets d'argent portant les boues activées (5 g d'argent / boues solides secs kg) et de contrôle (sans argent) les boues en conditions anaérobies. L'addition de nitrate d'argent ou de sulfure d'argent (100 mg d'argent / litre) pour méthanogène, cultures mixtes n'a pas affecté le taux et l'étendue de la

production de méthane, et l'inhibition de la méthanogénèse par thiosulfate d'argent a été trouvé pour être due à l'excès de l'accumulation de thiosulfate.

V.4.3.5 Dans les sols:

En général, l'accumulation de l'argent par les plantes terrestres à partir des sols est faible, même si le sol contenant de l'argent est modifié avec des boues d'épuration où les plantes sont cultivées sur les résidus de mines d'argent, où l'argent s'accumule principalement dans les systèmes racinaires (Ratte 1999). La germination était l'étape la plus sensible pour les plantes cultivées dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate d'argent. Les effets néfastes sur la germination étaient attendus à des concentrations supérieures à 0,75 mg d'argent / litre (comme le nitrate d'argent) pour la laitue et de 7,5 mg / litre pour le ray-grass (*Lolium perenne*) et d'autres plantes testées (Ratte, 1999). Smith & Carson (1977) ont signalé que les sprays contenant 9,8 mg d'argent / litre dissous tue le maïs (*Zea mays*), et sprays contenant 100-1000 mg/litre d'argent dissous tue la tomate (*Lycopersicon esculentum*) et les haricots (*Phaseolus spp.*) Des plantes. Semences de maïs, la laitue (*Lactuca sativa*), d'avoine (*Avena sativa*), le navet (*Brassica rapa*), le soja (*Glycine max*), les épinards (*Spinacia oleracea*), et de chou chinois (*Brassica campestris*) ont été plantés dans les sols amendés avec du sulfure d'argent et boues d'épuration pour contenir autant que 106 mg d'argent / kg de sol en poids sec (Hirsch et al, 1993; Hirsch, 1998a). Toutes les plantes ont germé, et la plupart ont grandi normalement à la concentration la plus élevée du sol d'argent testé. Les rendements de laitue, de l'avoine, le navet et le soja étaient plus élevés sur les sols amendés avec de l'argent chargé, boues activées que sur les sols de contrôle, mais la croissance du chou chinois et la laitue a été affectée à 14 mg d'argent / kg de sol en poids sec et supérieur.

La concentration d'argent dans les parties comestibles de toutes les installations à tous les niveaux du sol d'argent testés, sauf la laitue, étaient inférieures à 80 ng / kg de poids sec, ce qui suggère que la disponibilité des boues origine sulfure d'argent à la plupart des cultures agricoles est négligeable. Laitues cultivées dans un sol contenant 5 et 120 mg d'argent / kg de poids sec avait environ 0,5 et autant que 2,7 mg d'argent / kg de poids sec laisse, respectivement, comparativement à 0,03 mg / kg de poids sec dans les contrôles (Hirsch et al., 1993; Hirsch, 1998a).

V.5 Analyses de l'Argent :

Une variété de techniques d'analyse spectrographique, colorimétriques, polarographiques, et d'autres sont utilisés pour la mesure de routine de l'argent dans des échantillons biologiques et abiotiques. Concentrations d'argent déclarés avant la mise en œuvre de l'échantillonnage de métal ultra-propre, qui a commencé à la fin des années 1980, doivent être traités avec prudence.

L'absorption atomique et spectroscopie d'émission à plasma sont peut-être les techniques analytiques les plus largement utilisés pour la détermination des niveaux d'argent dans l'air, le sol et l'eau. Pluies et al. (1984) ont utilisé la spectroscopie d'absorption atomique avec flamme atomisation et la spectroscopie de courant continu d'émission atomique à plasma pour déterminer les niveaux d'argent dans le lixiviat des déchets solides. Les limites de détection de l'argent dans des échantillons de lixiviats par les deux techniques sont respectivement 0,473 ug / ml et 0,38 pg/ litre.

Les techniques voltamétriques sensibles en utilisant le décapage anodique ont été développés pour mesurer gratuitement les ions d'argent en solution à des concentrations aussi faibles que

0,1 ug / litre (Schildkraut, 1993; Song & Osteryoung, 1993; Schildkraut et al., 1998). Cependant, l'épuisement anodique voltammétrique la méthode ne fonctionne pas bien avec des échantillons naturels contenant de grandes quantités de matière organique, tels que ceux trouvés dans les usines de traitement des eaux usées (Ownby et al., 1997).

Les niveaux de trace d'argent (10^{-6} à 10^{-9} g / g de l'échantillon) peut être déterminée avec précision dans des échantillons biologiques par plusieurs techniques d'analyse différentes. Ces méthodes comprennent la spectroscopie plasma haute fréquence émission torche-atomique, l'analyse par activation neutronique, four graphite (sans flamme) spectroscopie d'absorption atomique, la spectroscopie d'absorption atomique de flamme, et la spectroscopie d'absorption atomique micro-tasse. la spectroscopie d'absorption atomique équipée de divers atomiseurs est la méthode analytique la plus utilisée. La spectroscopie d'absorption atomique en four de graphite offre une haute détectabilité (subnanogram par gramme d'échantillon) et nécessite relativement un petits échantillons pour l'analyse de tissus biologiques (DiVincenzo et al., 1985). Les limites de détection sont respectivement de 0,02 ug / g, de 0,2 ug / g, 0,005 g / litre, et de 0,5 ug / 100 ml ont été obtenus pour les cheveux, les fèces, l'urine et le sang. Starkey et al. (1987) ont modifié la technique spectroscopie d'absorption atomique à four graphite pour déterminer les niveaux d'argent à l'état de traces et des échantillons de sang ont indiqué une limite de détection de 15 ng / 100 ml.

les techniques d'analyse pour mesurer les niveaux d'argent oligo sont extrêmement complexes, et, à moins que les récipients d'échantillons appropriés sont utilisés, l'argent dans une solution peut être perdu aux parois du récipient en quelques heures après le prélèvement (Wen et al., 1997). Wen et al. (1997) ont constaté que le rayonnement ultraviolet de l'eau de l'échantillon systématiquement réalisé 100% de récupération. Ils ont également trouvé que le procédé d'irradiation aux ultraviolets a été nécessaire pour l'analyse d'argent dans des solutions colloïdales concentrées. La présence de matières organiques et de sulfure grappes a été montré pour améliorer la perte de l'argent dans l'eau naturelle.

Chapitre VI

Préparation de minerai

VI. Préparation mécanique du minerai :

VI.1 Stade de fragmentation

La préparation mécanique regroupe les opérations qui se situent en amont de l'enrichissement des minerais par les procédés minéralurgiques ou hydrométallurgiques. Il faut amener le minerai à pouvoir libérer les entités minéralogiques valorisantes des minéraux utiles de la gangue, c'est-à-dire atteindre la maille de libération. Ces opérations sont couplées avec des opérations de classement, visant soit à obtenir un simple calibrage de la matière fragmentée, soit à soustraire à la fragmentation les grains de dimension requise. Les opérations mécaniques sont caractérisées par le degré de réduction R, qui représente le rapport entre la dimension des plus grands blocs avant et après fragmentation :

$$R = \frac{D_{max}}{d_{max}}$$

VI.1.1 Concassage :

C'est un enchaînement d'opérations délivrant des particules de dimensions généralement inférieures à 1cm. Le concassage se pratique toujours à sec; on distingue les stades de concassage suivants :

a) Le concassage grossier (primaire ou débitage) :

Il diminue des tailles de blocs, obtenus par abattage, jusqu'à atteindre une dimension inférieure à 100mm.

b) Le concassage secondaire (intermédiaire) :

Il délivre des éléments de taille inférieure à 25mm.

c) Le concassage tertiaire (fin) :

Il délivre des fragments de taille inférieure à 10mm. Le choix des appareils de fragmentation dépend de :

- La répartition des entités minérales utilisées au sein de la roche.
- La dimension des produits entrant et sortant des concasseurs.
- La finesse, la dureté, l'humidité et la pollution du produit.
- La production horaire.
- L'usure et la maintenance de l'équipement.
- Les coûts d'investissement, etc....

VI.1.2 Broyage :

Le broyage consiste à réduire les produits fournis par le concassage en grains de taille comprise entre 7 et 0.4mm. Pour les minerais métalliques, le broyage est poussé jusqu'à une taille inférieure à 0.4mm (pulvérisation). On distingue trois types de broyage :

1. Broyage à sec (moins de 2% d'eau dans le produit).
2. Broyage semi humide (2 à 25% d'eau dans le produit).
3. Broyage en phase liquide ou broyage à voie humide (25 à 300% d'eau dans le produit).

Il est impossible d'obtenir la libération complète des grains minéraux, car dans ce cas il faudrait appliquer un broyage très fin, ce qui conduit à une consommation excessive d'énergie (environ 50% de la consommation totale dans le procédé d'enrichissement) très coûteuse. En outre, un

surbroyage peut produire des grains trop fins, dont le traitement ultérieur s'avère être difficile, conduisant à une diminution de la teneur en composant utile dans le produit fini (concentré). Il s'agit donc de broyer à une finesse compatible avec toute séparation (concentration enrichissante choisie). Dans la préparation des minerais, le choix se limite la plupart du temps aux broyeurs à barres et aux broyeurs à boulets, car :

- Ils sont robustes et simples ;
- Leur surveillance et entretien sont faciles ;
- Ils peuvent broyer fin les roches dures et abrasives à un prix de revient acceptable ;
- Ils peuvent travailler en voie sèche et en voie humide.

Dans les broyeurs à barres ; il n'y a pas de surbroyage, parce que les particules grosses se trouvant entre les barres préservent les particules plus petites de surbroyage. Il n'y a donc aucun intérêt à faire travailler les broyeurs à barres en cycle fermé avec classificateur. Pour éviter le surbroyage des grains de finesse suffisante, afin, d'augmenter le rendement énergétique, le broyeur à boulets est presque associé à un classificateur.

VI.2 Analyse granulométrique :

La classification des grains suivant leurs dimensions (pour les séparations inférieures à 1mm) est un procédé basé sur la vitesse de déplacement de grains dans un fluide (eau, air) sous l'action de la pesanteur ou de la force centrifuge. La sédimentation se produit en masse et toujours par équivalence (solide équitombant) «deux particules sont équitombant quand leurs vitesses limites de sédimentation sont identiques ». La classification effectuée dans la section du broyage, a pour but :

- D'éviter un surbroyage inutile des particules ayant atteint la finesse voulue.
- De rebroyer les grains de dimensions supérieures à la maille de libération désirée.
- D'augmenter l'efficacité et le rendement des broyeurs.

Les opérations de classement par dimension sont réalisées avec des appareils, les «classificateurs », pratiquant une seule coupure, donc donnant deux produits :

- 1. Une sur-verse (over flow) constituée par les grains fins.**
- 2. Une sous-verse (underflow) constituée par les gros grains.**

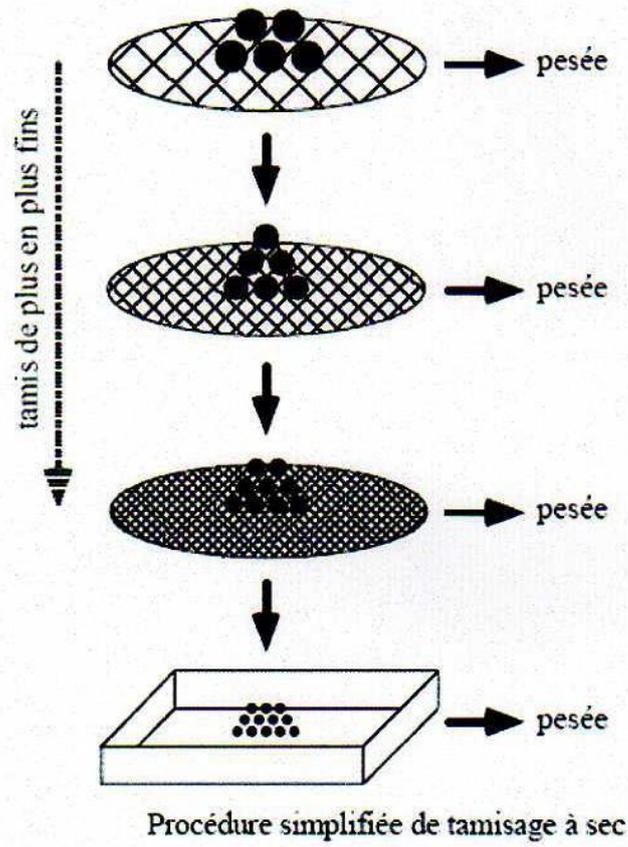


Figure 9- procédure simplifiée du tamisage à sec

Chapitre V

Biolixiviation du minerai d'EL ABED

VII. Minerai d'EL ABED :

35 km : Piste à dr. vers le Ghar Roubane (plomb argentifère), en terrain boisé, à environ 1 000m d'alt.

58 km : El Abed, nouvelle agglomération, proximité des mines de zinc et de plomb qui ont longtemps dépendu des: mines similaires de Zellidja au Maroc.

L'échantillon du minerai utilisé pour la réalisation de ce travail a été prélevé dans l'aire de stockage de la mine d'EL ABED.

VII.1 Caractérisation minéralogique du minerai :

La caractérisation minéralogique a été réalisée à partir de sections polies observées au Microscope optique polarisant en lumière réfléchie.

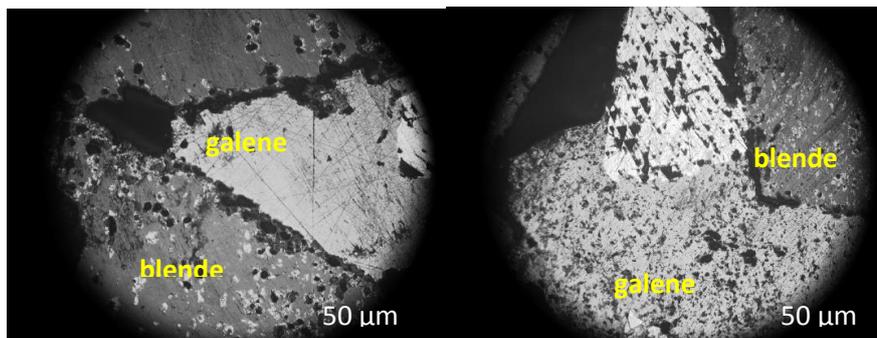


Figure 11- minerai d'EL ABED en section polie observé sous le microscope

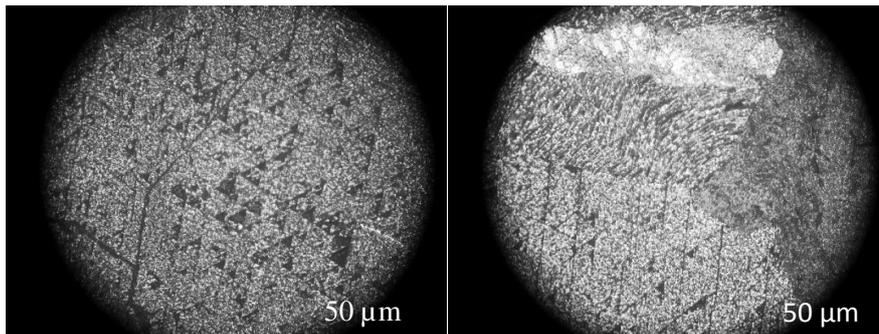


Figure 10- lame mince confectionné du minerai d'EL ABED observé sous le microscope

VII.2 ESSAIS :

VII.2.1 Préparation du minerai d'EL ABED :

La préparation du minerai s'est faite au niveau du laboratoire de minéralurgie du département de Genie Minier de l'Ecole

Le minerai a été réduit à un diamètre de $\leq 80\mu\text{m}$ dans le but d'augmenter la surface de contact entre le minerai et les bactéries et d'accélérer le processus durant la phase de biolixiviation.

Le minerai est concassé puis broyer et en fin tamiser

VII.2.2 Procédure des essais de biolixiviation :

Pour mesure du potentiel de lixiviation du minerai d'EL ABED par les bactéries contenues dans la boue activées utilisée on a procédé aux essais suivants.

Tous les essais de lixiviation ont été effectués avec des volumes de 30 mL de boue activée déposés dans des flacons d'analyse de 60 mL. à Chacun des échantillons de boues activées a été ajouté une quantité de 3g du minerai de la mine d'EL ABED.

Les échantillons ont été agités toutes les 24 heures pour une durée de 20 jours lors de la biolixiviation. Les essais ont été faits en milieu anaérobique.

Pour l'essai de l'adsorption des bactéries pour l'Argent on a procédé par l'ajout de 30ml d'une solution de nitrate d'argent (Ag NO_3) d'une concentration de 100 mg/l agitée pour une période de 20 jours.

Les échantillons de tous les essais étaient centrifugés à 10000 x g pendant 30 minutes. La fraction liquide était conservée pour l'évaluation des concentrations de l'Argent spectrophotométrie à absorption atomique de flamme.

VII.3 Résultat :

VII.3.1 Analyse du minerai d'EL ABED :

Après le concassage et le broyage du minerai et la réduction du diamètre des grains à $d \leq 80 \mu\text{m}$ on a procédé à son attaque chimique par L'eau régale Puis la concentration de l'Argent dans l'échantillon est analysée par spectrophotométrie d'absorption atomique de flamme (SAA).

VII.3.1.1 L'eau régale :

L'eau régale ou eau royale (*aqua regia* en latin) est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique concentrés dans une proportion de 2 à 4 volumes d'acide chlorhydrique pour 1 d'acide nitrique. Elle est appelée ainsi parce qu'elle est capable de dissoudre certains métaux nobles tels le platine, l'or ou le tantale insolubles dans ces acides seuls ou dans tout autre acide simple concentré

VII.3.2 Expérimentation :

On a pesé un échantillon de 5g du minerai d'EL ABED à une précision de 10^{-4} .



Figure 12: pesée des échantillons

On attaque l'échantillon avec L'eau régale et on le chauffe jusqu'à sec (sur une plaque chauffante sous une hotte) pour former des nitrates de métaux



Figure 13: chauffage des échantillons attaqués par l'eau régale

Tous les éléments du minerai vont être dissouts.

Etape 2 :

On met 10 ml de HCl , on évapore jusqu'à sec pour enlever les nitrates

On attaque avec 20ml de HCl $\frac{1}{4}$ on chauffe 10 min

On filtre dans des fioles de 100ml et on jauge jusqu'à 100ml



Figure 14: filtrage après l'attaque par les acides

On analyse la solution par SAA



Figure 15 : spectromètre d'absorption atomique à flamme

Formule de calcul :

$$\% \text{ élément} = \frac{10^{-6} * 100\% * 100\text{ml}}{\text{masse prélevée (g)}} * \gamma$$

γ : Concentration donnée par la SAA

m : masse du minerai prélevé au départ

Echantillon	%Ag	Ag (g/t)
Minerai concassé	0.017	168.8
Produit cellule de flottation	0.018	188.1
Produit final de l'usine	0.032	315.55

Tableau 7 taux d'Ag dans les échantillons prélevée à EL ABED.

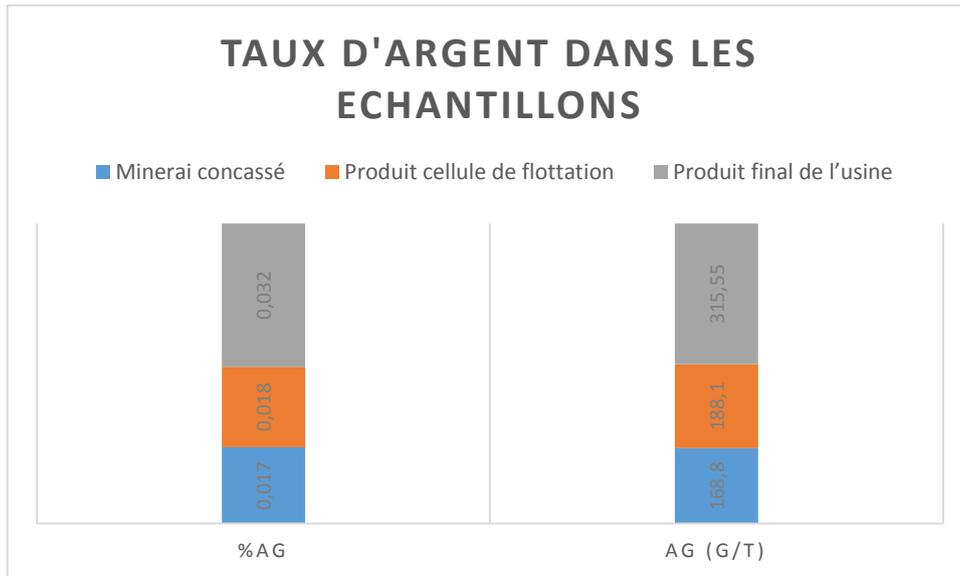


Figure 16 taux d'argent dans les différents échantillons prélevés à EL ABED

De la figure 10 représente le taux d'argent contenu dans les différents échantillons prélevé à savoir le minerai, le produit de cellule, et le produit fini de l'usine d'EL ABED. on remarque c'est le produit fini de l'usine qui contient le plus d'argent (315,55 g/t). Pour le produit de cellule de flottation et le minerai contiennent des quantités d'argent relativement proche un peu plus élevée pour le produit de cellule (188,1 g/t) contre (168,8 g/t) pour le minerai.

Ceci peut s'expliquer par l'élimination des impuretés lors du traitement dans l'usine.

VII.4 Résultats des essais de biolixiviation :

VII.4.1 PH de la solution lixiviée :

Le ph de la boue activée après 20 jours de lixiviation varie de 6,21 à 6,78 à une température ambiante de 23°C.

Quant au PH de la boue mise en contact avec une solution de nitrate d'Argent ($Ag NO_3$) pour l'observation de l'adsorption des bactéries pour l'argent est de 7,37 à une température de 23°C

VII.4.2 Adsorption de l'Argent par les bactéries :

Les bactéries ont adsorbés tout l'Argent contenu dans 30 ml dans la solution de nitrate d'Argent d'une concentration de 100mg/l.

Donc la membrane des bactéries adsorbent l'Argent en solution.

VII.4.3 Lixiviation :

L'analyse par SAA de l'échantillon de lixiviation à donner les résultats suivant :

Dans la solution de lixiviation :

élément	Concentration (mg.l ⁻¹)
Ag	<0.01
Pb	0.318
Cu	0.054
Zn	0.124

Tableau 8 : Analyse de l'échantillon de biolixiviation du minerai d'EL ABED par la SAA

Dans le filtrat après attaque acide :

élément	taux
Ag	78.333 g/t
Pb	26.119 %
Cu	0.055 %
Zn	5.038 %

Tableau 9 : Analyse du filtrat de l'échantillon de biolixiviation par la SAA

Des résultats obtenu on voit que les bactéries ont lixiviées une quantité d'Argent inférieur à 0.01 mg.l⁻¹ ce qui n'est pas important après 20 jours de lixiviation en conditions ambiantes.

Mais cette faible concentration dans la solution peut s'expliquer l'adsorption de bactéries pour l'argent montré par l'essai d'adsorption de l'argent par les bactéries

On remarque aussi la présence de Plomb ; Zinc ; et de Cuivre en quantité relativement importante par rapport aux concentrations initiales contenu dans le minerai lixivié. Cela veut dire les bactéries présente de la boue activée ont lixivier ses trois éléments.

Remarque :

Les tests qui n'ont pas pu être effectué pour faute de dispositifs et matériels adéquat des exemples sont citer en annexes.

Conclusion :

Les essais réalisés ont permis de montrer que le minerai d'EL ABED contient de l'argent à un taux de 168.8 g/t (la teneur n'est pas très importante car c'est un élément accompagnateur dans le minerai)

Les bactéries contenues dans la boue activée ont permis de lixivier une partie de l'argent qui était dans le minerai ; une partie de cet Ag a été adsorbée par les bactéries, comme elles ont permis de lixivier le plomb et le zinc qui se trouvent dans la blende et la galène du minerai.

La faible performance peut s'interpréter par la toxicité de l'argent pour les micro-organismes.

Les essais ont été réalisés en un anaérobie sans nutriment ce qui ne donne pas un rendement optimal par les bactéries extrémophiles qui s'activent mieux dans un pH proche de 2.

Les cellules vivantes comme les cellules mortes ont la propriété de fixer et d'accumuler les ions métalliques

Conclusion générale

VIII. Conclusion générale :

Les objectifs visés à l'origine de ce travail portaient sur un essai de récupération de l'argent Ag contenu dans le minerai d'EL ABED réalisée dans des conditions de lixiviation statique et en un milieu anaérobique sans nutriment.

La mise en œuvre, d'une synthèse sur la biolixiviation et les micros organismes .le contrôle et les applications d'une oxydation bactérienne.

Les résultats montrent que la biolixiviation est une très bonne alternative aux méthodes traditionnelles de lixiviations souvent très polluantes. Et peut donner des possibilités d'exploitations de gisement à faible teneur.

Les bactéries n'adhèrent pas immédiatement aux nouveaux milieux et au contacté de nouvelle substances.

Les tas de minerai ou les stériles miniers constituent des environnements très variables et extrêmement complexes, dont les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques peuvent influencer la croissance et l'activité bactérienne ainsi que les vitesses de solubilisation des constituants minéraux.

L'activité et la vitesse de l'oxydation bactérienne des sulfures sont influencé par la minéralogie du minerai

D'autres paramètres interviennent dans ce type de systèmes. Ces paramètres sont principalement liés aux facteurs limitants de la croissance bactérienne : température, pH, potentiel d'oxydoréduction, granulométrie et disponibilité du substrat, ... (Kelly et Tuovinen, 1988). Peu de renseignements précis existent sur l'influence de ces paramètres considérés comme des conditions opératoires sur la biooxydation des minerais.

Plusieurs modèles ont été proposés pour essayer de caractériser et de prédire les phénomènes réactionnels qui ont lieu lors de l'oxydation de sulfures à l'intérieur d'un tas ou d'un terril minéral. Mais ceci seulement pour des minerais de cuivre ou pour des stériles sulfurés. La plupart des modèles considèrent que l'oxydation des sulfures dépend seulement des cinétiques de réaction à l'échelle microscopique, c'est à dire celle de la particule minérale (Bartlett, 1973). Ils négligent les mécanismes macroscopiques en estimant que la concentration de l'élément oxydant est homogène à l'intérieur du tas en entier. En revanche, d'autres modèles prennent aussi en compte les facteurs macroscopiques, tels que la distribution granulométrique (Davis et Ritchie, 1987) ou l'effet de transport par convection des gaz et des solutions due aux variations de température (Pantelis et Ritchie, 1990). Quoi qu'il en soit, l'influence de paramètres tels que la granulométrie, le débit de percolation et la température sur l'oxydation statique de sulfures est reconnue, mais doit être précisée.

*Ces résultats montrent que dans les dispositifs de lixiviation statique les bactéries *Tbjobacillus fmooxj* dans sont en majorité étroitement fixées à la surface du minéral et que les bactéries peu fixées ou dans les eaux interstitielles et libres en suspension dans les eaux de percolation (beaucoup moins nombreuses) sont des bons indicateurs de l'activité biooxydante. Le rôle de ces différentes classes de bactéries est encore à préciser mais leur croissance et leur activité sont liées à divers paramètres minéralogiques et opératoires. L'oxydation des minerais sulfurés aurifères réfractaires par voie bactérienne en lit statique est possible et techniquement envisageable. Cependant, le passage d'une telle opération à une exploitation industrielle exige encore des travaux pour évaluer sa faisabilité sur le plan technico-économique.*

L'introduction de procédés biohydrométallurgiques veut conduire à de substantiels progrès dans l'industrie de la production de métaux en augmentant le profit par une amélioration de leur récupération, une réduction des coûts de production et l'exploitation de nouvelles ressources. Le potentiel d'avancée technologique est mis en évidence par l'intérêt croissant montré par

l'industrie minérale et métallurgique dans ce domaine. La diversification des cibles de ressources et de métaux concernés constitue un élément majeur de développement. La biomine veut combler les manques actuels dans notre compréhension du meilleur moyen d'appliquer les procédés biologiques pour les minerais métallifères traditionnellement considérés comme réfractaires aux traitements conventionnels pour des raisons techniques et économiques.

Il y a lieu de souligner que cet ensemble de méthodes expérimentales et analytiques mises en oeuvre pour ce travail a un caractère pluridisciplinaire pour répondre aux questions posées par ces études des interactions "microorganismes - solution - minéraux". C'est là une des difficultés d'un tel sujet mais aussi une de ses richesses de faire appel à des démarches qui concernent la microbiologie, la minéralogie, le traitement de minerais et la physico-chimie des systèmes "surface - solution".

PERSPECTIVES

Dans cette perspective de développement industriel, les travaux envisagés devront porter d'abord, sur l'étude de la biolixiviation de minerais argentifères tout-venants en pilote semi industriel.

L'avancement des cinétiques d'oxydation doit être évalué en fonction de la maille de libération des sulfures porteurs et de la granulométrie de broyage nécessaire pour obtenir un compromis entre l'accessibilité des sulfures et le bouletage du minerai broyé.

En ce qui concerne les perspectives à caractère fondamentale, trois volets de recherche doivent être ciblés : En premier lieu, la recherche doit porter sur la quantification de l'activité oxydante pour chaque catégorie de bactérie (bactéries libres en suspension, bactéries libres dans les eaux interstitielles et bactéries fixées) dans un milieu poreux hétérogène. En effet, la mise en place d'une méthode qui permette de mesurer et de suivre l'activité des bactéries acidophiles qui oxydent le minerai *in situ* est nécessaire.

Deuxièmement, l'étude de la colonisation des bactéries introduites dans les systèmes poreux hétérogènes avec l'inoculum et leur compétition avec les bactéries autochtones apportées par le minerai.

Le troisième volet doit concerner l'utilisation des bactéries autochtones oxydantes afin de diminuer la compétition avec les bactéries apportées et d'améliorer par conséquent les rendements d'oxydation des sulfures.

Bibliographie

Bibliographie

- 1) First draft prepared by Mr P.D. Howe and Dr S. Dobson, Centre for Ecology and Hydrology, Monks Wood, United Kingdom
- 2) BioMinE - Biotechnologies pour la récupération des métaux en Europe <http://biomine.brgm.fr>
- 3) Microbiologie et extraction des métaux par Dominique MORIN
- 4) Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation Coordination technique : Frédérique CADIERE Département Sites et Sols Pollués – Direction Déchets et Sols - ADEME (Angers)
- 5) Les micro-organismes au cœur des biotechnologies par : Catherine FOUCAUD SCHEUNEMANN Chargé de recherche INRA, Département Microbiologie et chaîne alimentaire Centre de recherche de Versailles-Grignon et Sandra HELINCK Maître de conférences à AgroParisTech
- 6) Biotechnologies dans la métallurgie extractive – microbiologie et extraction des métaux par : Dominique MORIN Docteur-Ingénieur, Responsable de la Division Propriété Intellectuelle, Valorisation et Innovation du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières)
- 7) Thèse de doctorat Jean-François Blais Biolixiviation des métaux lourds des boues d'épuration municipales 1. Aspects microbiologiques Université du Québec 1992
- 8) These de doctorat DÉPOLLUTION ET VALORISATION DES REJETS MINIERS SULFURÉS DU KATANGA « Cas des tailings de l'Ancien Concentrateur de Kipushi » Par Willy KITOBO SAMSON Ingénieur Civil Chimiste de l'Université de Lubumbashi Diplômé d'Etudes Approfondies en Sciences de l'ingénieur de l'Université de Liège
- 9) Thèse de doctorat Biolixiviation de la carrolite – Applications aux minerais sulfurés polymétalliques de l'Arc Cuprifère du Katanga en République Démocratique du Congo (RDC) par Guy NKULU WA NGOIE UNIVERSITE DE LIEGE
- 10) Thes de doctorat *Biolixiviation- cyanuration de minerais sulfurés aurifères réfractaires en dispositifs de percolation: Comportement des populations de Thiobacillus ferrooxidans et influence de la minéralogie et des conditions opératoires* par : Marcos Gustavo MONROY FERNANDEZ L'INSTITUT NATIONAL POL YFECHNIQUE DE LORRAINE
- 11) BioMinE - Biotechnology for Metal bearing materials in Europe an Integrated Project under the Sixth Framework Programme
- 12) Progress after three years of BioMinE—Research and Technological Development
- 13) project for a global assessment of biohydrometallurgical processes applied to European non-ferrous metal resources D. Morin, T. Pinches [b](#), J. Huisman [c](#), C. Frias [d](#), A. Norberg [e](#), E. Forssberg [f](#)
- 14) Le monde Microbien : Partie 1 : Microbes et Microbiologie Professeur Emmanuel DROUET Université Joseph Fourier de Grenoble

- 15) Structure et physiologie de la bactérie : Anatomie – Structure Université Médicale Virtuelle Francophone
- 16) La Biolixiviation : des bactéries au service de la production des métaux Patrick d'Hugues Responsable Unité Déchets et Matières Premières Direction Eau/Environnement/Ecotechnologies BRGM
- 17) La biolixiviation des minerais sulfures Dominique Mor HAL Id: hal-00520887 <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00520887>
- 18) A review of recovery of metals from industrial waste U.U. Jadhav, H. Hocheng* Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University,
- 19) Clozel B ; Battaglia F ; Conil P ; Ignatiadis I avec la collaboration de Braibant G ; Breeze D ; Crouzet C ; Jézéquel P ; Gourmel J.P ; Gamet M ; Pillard F. (2002) – Traitabilité par des méthodes physiques, chimique et biologique des sols contaminés. Rapport final BRGM/RP-52065- FR, 356 p. 81 fig 47tabl ; 9ann.
- 20) DÉPOLLUTION ET VALORISATION DES REJETS MINIERS SULFURÉS DU KATANGA
- 21) « Cas des tailings de l'Ancien Concentrateur de Kipushi » Par Willy KITOBO SAMSON
- 22) BERGEY (D.H.). – Bergey's manual of systematic bacteriology. 1984, Williams et Wilkins. Baltimore.

Site internet

<http://www.planetoscope.com/matieres-premieres/164-production-mondiale-d-argent.html>

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dossiers/d/chimie-argent-metal-precieux-731/page/2/>

<http://www.lenntech.fr/francais/data-perio/ag.htm#ixzz3b6xWApxA>

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/argent-metal/7-applications-industrielles-de-l-argent-et-de-ses-sels/#>

ANNEXES

Annexe 1

EXEMPLE :EVOLUTION DE L'ARSENOPYRITE OBSERVEE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE AU COURS DE L'OXYDATION BACTERIENNE

P II. 1. 4 jours de biolixiviation : apparition de fissures.

P II. 2. 11 jours de biolixiviation : apparition de petits trous.

P II. 3. 11 jours de biolixiviation : développement d'une phase superficielle amalgamée d'arséniates ferriques et de soufre élémentaire.

P II. 4. 10 à 20 jours de biolixiviation : apparition des orientations cristallines (macles) par le développement de la corrosion.

P II. 5. 10 à 20 jours de biolixiviation : combinaison du développement d'une porosité intragranulaire importante et de la corrosion contrôlée par les orientations cristallines.

P II. 6. 10 à 20 jours de bio lixiviation : pores ovoïdes développés par une corrosion contrôlée par l'orientation cristalline de l'arsénopyrite.

P II. 7. 30 jours de biolixiviation : diminution de la taille des grains d'arsénopyrite et formation des précipités (arséniates ferriques et soufre élémentaire).

P II. 8. Mélange pyrite - arsénopyrite après 30 jours de biolixiviation en cuve agitée : les grains de pyrite ont été protégés galvaniquement par l'arsénopyrite, dont la diminution de taille est très évidente.

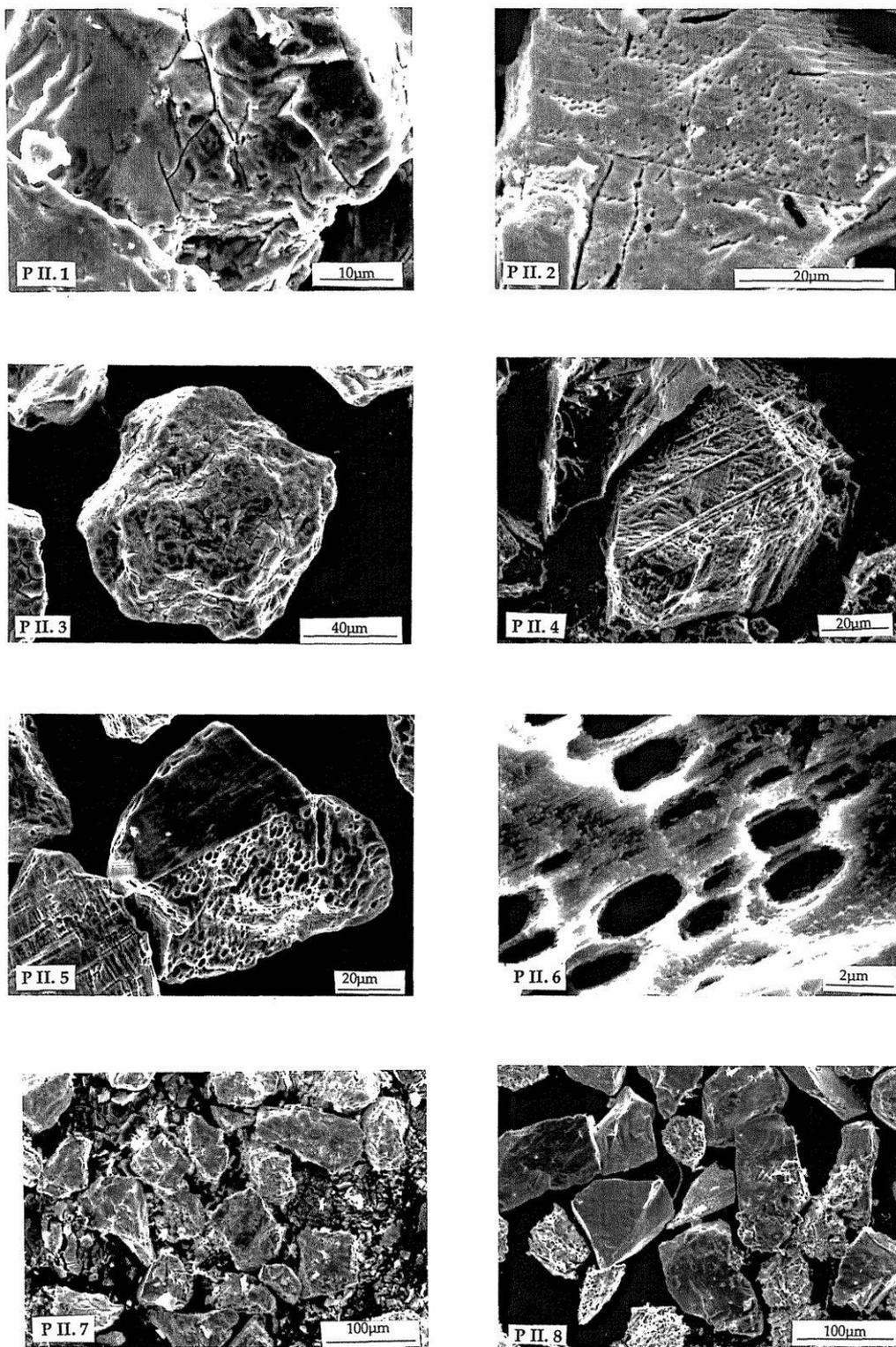


Figure 17: évolution d'un minéral lors d'une biolixiviation

Annexe 2

Exemple de bactéries au contact de minerais Durant la bio lixiviation observé au microscope à balayage électronique :

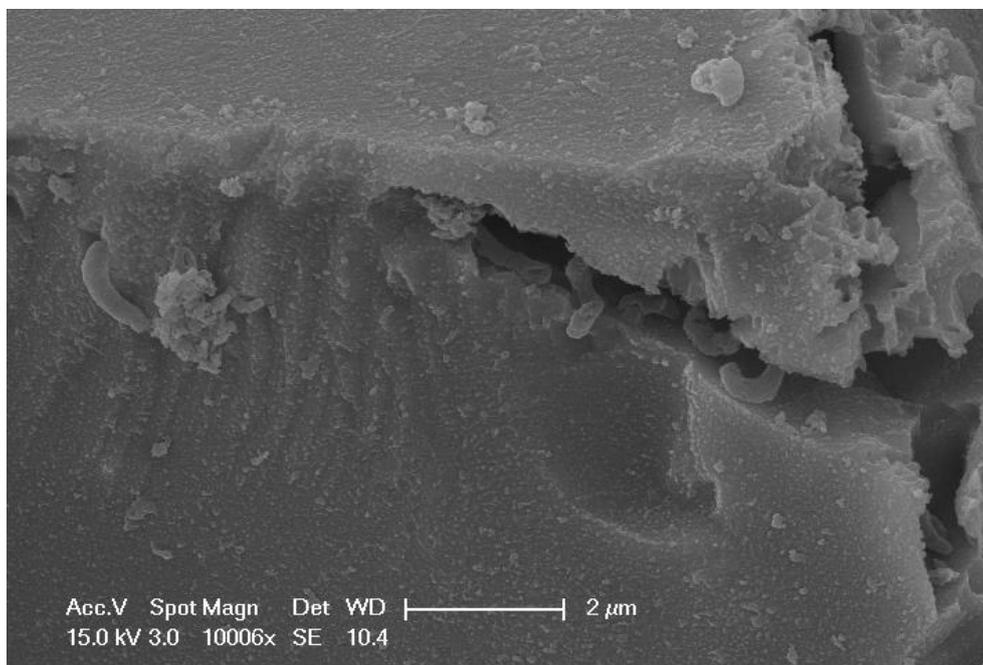
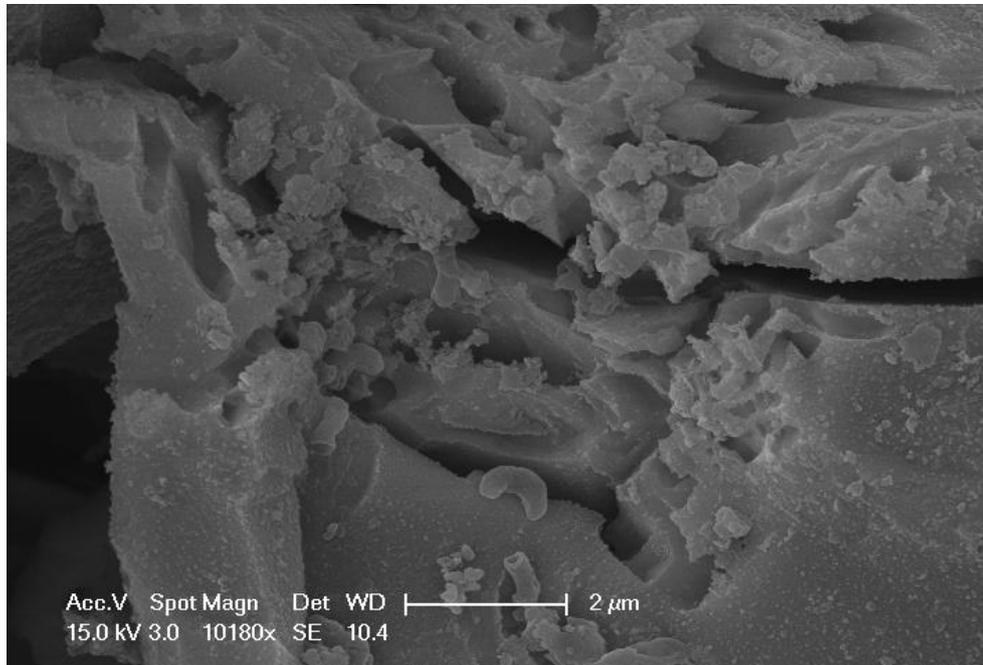
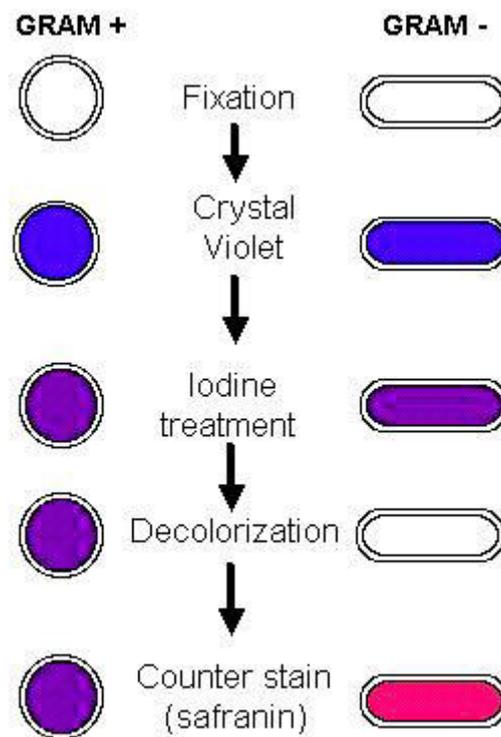


Figure 18: Images MEB montrant l'évolution des bactéries sur les grains de carrolite en cours de biolixiviation.

Annexe 3

Coloration de Gram :

Gram plus et moins

- fixation des bactéries sur une lame microscopique,
- un premier colorant : le "violet de gentiane"
 - mordantage au lugol. A ce stade, toutes les bactéries sont violettes.
 - lavage à l'alcool qui décolore les seules bactéries à paroi fine.
 - surcoloration à la fuchsine (rouge) qui recolore les bactéries décolorées.

Après coloration de Gram, les bactéries à paroi épaisses sont colorées en violet : et dites "à Gram positif", les bactéries à paroi fine sont colorées en rouge et dites "à Gram négatif".

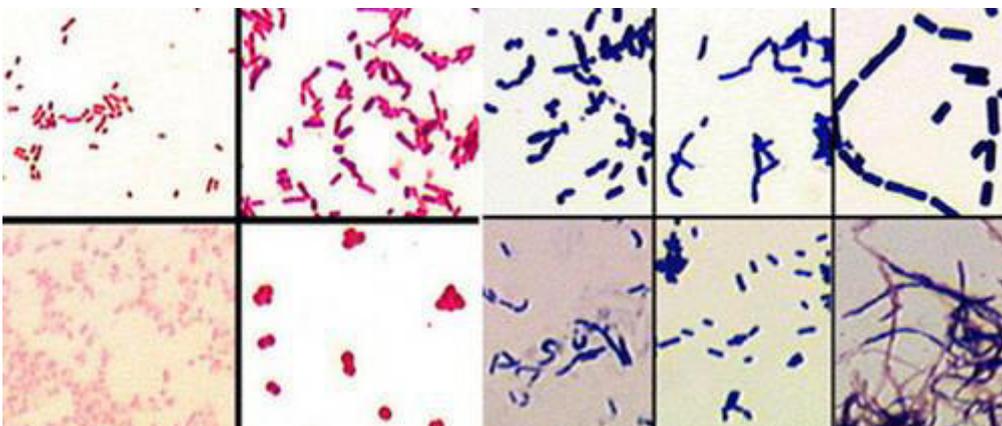


Figure 19: Exemple de test gram (+;-) sur des bactéries