

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

P0003/  
05A

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie minier

Thème

**Conception d'une base de  
données de procédés  
métallurgiques**

Proposé et dirigé par :

Mr : SAADA A.

Réalisé par :

MELLAL Hicham.

Promotion : 2005

## Résumé :

L'objectif de ce mémoire a consisté à analyser, répertorier, et donner toutes les principales étapes et opérations unitaires propres au traitement métallurgique (pyrométallurgie, hydrométallurgie) des minerais ou des concentrés métallifères et des substances utiles. Les principaux paramètres technologiques propres à ces opérations ont également été répertoriés et agencés. Quelques applications de schémas technologiques illustrent l'exécution de ces opérations. Le tout, par le biais d'Access, a été inclus dans une base de données, répondant à l'exploitation d'un gisement.

**Mots clés :** minerai, concentré, métal, bases de données.

## Summary:

The objective of this memory consists to analyze, to index, and give all the principal stages and unit operations suitable for the metallurgical treatment (Pyrometallurgy, hydrometallurgy) of the ore or the metalliferous concentrates and substances useful. The principal specific technological parameters to these operations also were index and arranged. Some applications of technological diagrams illustrate the application of these operations. The whole, by the means of Access, was included in a data base, answering to the exploitation of a layer.

**Key words:** ore, concentrate, metal, data bases.

## ملخص :

الهدف من هذه المذكرة يتمثل في إعطاء تحليل و تصنيف المعادن، يشمل كل المراحل الأساسية و العمليات الخاصة بالمعالجة التعدينية بصنفيها ( معالجة في وسط رطب، معالجة في وسط جاف) لمعدن خام أو مركز. ولهذا الغرض تم استعمال « Access » لانجاز هذا التطبيق لتسهيل عملية تحليل وتصفية المعادن .

**الكلمات المفتاحية :** معدن خام، معدن مركز ، التعدين، قاعدة المعلومات.

## DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents

A mes frères

A toute la famille

A mes amis



## Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à présenter nos plus vifs remerciements à Mr SAADA Abdel-hafid, pour avoir suivi et dirigé ce travail.

Nos remerciements vont également à Mr. A.AIT.YAHIA TENE, pour le suivi et les conseils judicieux sur la partie informatique de mon projet.

Notre gratitude va également aux membres du jury pour honorer notre soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce travail.

Qu'il nous soit permis de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	01
<b>Première partie : Partie théorique.....</b>	02
<b>I Introduction .....</b>	02
<b>I.1 Procédés métallurgiques .....</b>	03
<b>II Pyrométallurgie .....</b>	06
<b>II.1 Introduction.....</b>	06
<b>II.2 Opérations de séparation de phases en pyrométallurgie .....</b>	06
<b>II.2.1 L'agglomération .....</b>	07
<b>2.1.1 Technologie de l'agglomération .....</b>	07
<b>2.1.2 Nature du procédé et champ d'application de l'agglomération .....</b>	08
<b>II.2.2 Grillage .....</b>	10
<b>2.2.1 Les différents types ou modes de grillage .....</b>	10
<b>II.2.3 Fusion.....</b>	12
<b>II.2.4 Calcination.....</b>	13
<b>II.3 Types de four .....</b>	14
<b>II.3.1 Fours de grillage, d'agglomération et de calcination .....</b>	14
<b>II.3.2 Fours de première fusion .....</b>	17
<b>III Hydrométallurgie.....</b>	18
<b>III.1 Principes de l'hydrométallurgie.....</b>	18
<b>III.2 Prétraitement.....</b>	20
<b>III.2.1 Séparation physique .....</b>	20
<b>2.1.1 La séparation par densité .....</b>	20
<b>2.1.2 La flottation .....</b>	20
<b>2.1.3 La séparation magnétique .....</b>	21
<b>2.1.4 La séparation électrostatique .....</b>	21
<b>III.3 Lixiviation .....</b>	21
<b>III.3.1 Agents de lixiviation (solvant).....</b>	21
<b>III.3.2 Types de lixiviation.....</b>	26

<b>III.4</b>	Séparation solide/liquide après lixiviation.....	28
<b>III.4.1</b>	La décantation.....	28
<b>III.4.2</b>	La filtration.....	29
<b>III.4.3</b>	La centrifugation.....	29
<b>III.5</b>	L'extraction .....	30
<b>III.5.1</b>	Extraction liquide/ liquide.....	32
<b>III.5.2</b>	Extraction solide/liquide .....	34
<b>III.5.3</b>	Extraction par solvant.....	38
<b>III.6</b>	La précipitation .....	39
<b>III.7</b>	Electrolyse .....	39
<b>III.7.1</b>	La cellule d'électrolyse .....	40
<b>III.7.2</b>	Bilan énergétique de l'électrolyse .....	40
<b>III.8</b>	Cémentation .....	43
<b>III.8.1</b>	Réaction de cémentation .....	43
<b>III.8.2</b>	Cinétique de la réaction de cémentation.....	44
<b>III.8.3</b>	La pratique de la cémentation .....	44
<b>III.9</b>	La sorption (échange ionique) .....	45
<b>III.9.1</b>	Classification principale, notion et terminologie.....	47
<b>III.9.2</b>	L'échange ionique .....	48
<b>III.9.3</b>	Les matériaux échangeurs d'ions .....	48
<b>III.9.4</b>	Les résines échangeuses d'ions .....	48
<b>III.9.5</b>	Les stades du procédé d'échange ionique .....	48
<b>IV</b>	Exemples de procédés métallurgique (Zn, Pb,Cu).....	51
 <b>Deuxième partie : Partie Application.....</b>		<b>57</b>
<b>I</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>57</b>
<b>II</b>	<b>L'outil de développement .....</b>	<b>57</b>
<b>II.1</b>	Les objets d'Access .....	57
<b>II.1.1</b>	Base de données .....	57
<b>II.1.2</b>	Les tables .....	58
<b>II.1.3</b>	Les formulaires .....	58
<b>II.1.4</b>	Les états .....	58
<b>II.1.5</b>	Les macros .....	59



II.1.6	Les modules .....	59
II.1.7	La requête .....	59
II.2	Clé primaire ou index .....	60
II.2.1	Les types de relation .....	60
II.2.2	L'intégrité référentielle dans les relations .....	61
<b>III</b>	<b>Conception de l'application</b> .....	<b>62</b>
III.1	Introduction .....	62
III.2	Description des tables .....	62
III.2.1	Les clés primaires .....	62
III.2.2	Les différents champs utilisés dans les tables principales .....	64
III.2.3	Les différents champs utilisés dans les tables de paramétrage .....	70
III.2.4	Les relations entre les tables .....	71
III.2.5	Le schéma relationnel final de la base de données .....	72
<b>IV</b>	<b>Traitement de données</b> .....	<b>73</b>
IV.1	Introduction .....	73
IV.2	Les formulaires .....	73
IV.2.1	Les formulaires principaux.....	73
IV.3	Les requêtes.....	74
IV.4	Création de macros .....	74
IV.5	Le paramétrage .....	75
IV.6	La recherche .....	78
IV.7	Les boîtes de message .....	78
IV.8	L'optimisation de saisie .....	79
<b>V</b>	<b>Description de l'application</b> .....	<b>80</b>
	<b>Conclusion générale</b> .....	<b>82</b>
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>83</b>



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# Introduction générale

## Introduction générale :

La métallurgie extractive peut être divisée en deux parties : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie.

La pyrométallurgie a été la première employée, cela dès l'antiquité.

L'hydrométallurgie s'est fortement développée depuis le début du siècle et a souvent pris le pas sur des procédés pyrométallurgiques pour la production de nombreux métaux.

Par rapport à la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie est moins coûteuse en énergie du fait que les opérations sont effectuées à des températures bien inférieures. Le facteur de taille est aussi à considérer car de petites unités peuvent être conçues à des coûts réduits. Elle permet aussi le traitement de minerais plus pauvres tout en améliorant le raffinage et le rendement de l'extraction.

L'étude, à laquelle nous sommes fixés, traduit les différentes opérations propres à l'industrie métallurgique ; les principaux paramètres technologiques relatifs à chaque opération sont répertoriés. A cet effet, une description succincte de chaque opération, ainsi que l'énumération des paramètres apparaîtront dans la partie théorique.

La partie pratique, quant à elle, est destinée à répertorier, à ordonner et à agencer toutes les opérations et paramètres dans une base de données. Quelques applications permettront d'illustrer et de comprendre le cheminement technologique d'une usine métallurgique, faisant appel à des procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques.

# Partie théorique



## I. Introduction :

Depuis un demi-siècle, la métallurgie extractive n'a cessé de progresser, de l'état d'une technique traditionnelle à celui d'une technique très évoluée.

En effet, n'importe quel métal peut devenir un métal industriel si le besoin s'en fait sentir. En conséquence, on a tenté avec succès de rattacher les différences existant entre les métallurgies connues et les propriétés des métaux qu'elles extraient. Parmi ces différences, une traduction de la nature spécifique d'un métal est l'enthalpie libre de formation des oxydes et des halogénures. On a pu ainsi regrouper les métaux dans deux ensembles : le groupe des métaux réactifs vis-à-vis d'un métalloïde donné, lorsque l'enthalpie libre de formation est élevée et, à l'inverse, le groupe des métaux non réactifs, lorsque celle-ci est modérée. Dès lors, la métallurgie extractive a pu faire un appel de plus en plus large aux données scientifiques, et de ce fait comprendre et maîtriser les phénomènes chimiques.

La métallurgie extractive peut être divisée en deux parties : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie.

La pyrométallurgie a été la première employée, cela dès l'antiquité.

L'hydrométallurgie, quant à elle, n'a vu le jour qu'à partir de la fin du XIX siècle : le procédé de cyanuration de l'or a été développé en 1887, celui de l'argent en 1900. L'électrolyse du zinc n'a été réalisée qu'à partir de 1916.

L'hydrométallurgie s'est fortement développée depuis le début du siècle et a souvent pris le pas sur des procédés pyrométallurgiques pour la production de nombreux métaux (Zn, Ni, Cu). Tout d'abord utilisée pour le traitement de minerais ou de concentrés, elle est employée, depuis une quinzaine d'années, dans le traitement de déchets métalliques.

Par rapport à la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie est moins coûteuse en énergie du fait que les opérations sont effectuées à des températures bien inférieures. Le facteur de taille est aussi à considérer car de petites unités peuvent être conçues à des coûts réduits. Elle permet aussi le traitement de minerais plus pauvres tout en améliorant le raffinage et le rendement de l'extraction.



## I.1 Procédés métallurgiques :

Le choix des matières premières, dont peuvent disposer les différentes usines de métaux non ferreux, est étendu et signifie qu'il a fallu inclure une grande variété de procédés d'élaboration métallurgique dans la section "Meilleures techniques disponibles" (MTD), pour la majorité des groupes de métaux. Très souvent, le choix du procédé est dicté par les matières premières, de sorte que le type de four n'entre que pour une part mineure dans la détermination de la meilleure technique disponible, à condition que le four ait été conçu pour les matières premières utilisées et qu'il comporte une récupération d'énergie lorsque les conditions le permettent.

Il y a toutefois des exceptions. Par exemple, l'utilisation de cuves à anodes précurées avec piquage et alimentation en alumine multipoints au centre de la cuve a été identifiée comme une MTD pour l'aluminium primaire, de même qu'est classée MTD, dans la production de certains ferroalliages, l'utilisation de fours étanches qui permet de capter des gaz à grand pouvoir calorifique. Pour le cuivre de première fusion, le four à réverbère n'est pas considéré comme faisant partie des MTD.

Les autres facteurs majeurs sont le dosage des matières premières, le contrôle commande du procédé, la gestion et le captage des fumées. La hiérarchie dans le choix d'un procédé nouveau ou modifié a été identifiée comme suit:

- Le prétraitement thermique ou mécanique des matières secondaires, afin de minimiser la contamination organique de la charge ;
- L'utilisation de fours ou autres postes de traitement étanches, qui permettent d'éviter les émissions fugitives, de récupérer les chaleurs perdues et de recueillir les gaz de procédé pour valorisation (par ex.+ utilisation du CO comme combustible et du SO<sub>2</sub> pour l'acide sulfurique) ou pour dépollution ;
- L'utilisation de fours semi-étanches lorsque des fours étanches ne sont pas disponibles ;
- La minimisation des transferts de métal entre procédés ;
- Lorsque ces transferts sont inévitables, l'utilisation de goulottes de coulée de préférence aux poches de transfert de métal liquide ;
- Dans certains cas, la restriction des techniques à celles qui évitent les transferts de métal en fusion peut empêcher la récupération de certaines matières secondaires, qui



entreront alors dans le circuit des déchets. Dans ces cas, l'utilisation d'étages de captage secondaires ou tertiaires des fumées s'impose pour pouvoir récupérer ces matières;

- L'installation de hottes et de gaines prévues pour capter les fumées qui émanent des transferts et des coulées de métal, de mattes ou de scories à haute température ;
- Des enceintes autour des fours ou des réacteurs seront parfois indispensables pour éviter les rejets de fumées perdues dans l'atmosphère ;
- Si on juge qu'une enceinte et une extraction primaire seront inefficaces, le four peut être entièrement fermé avec l'air de ventilation repris par des ventilateurs d'extraction et dirigé vers un système adapté de traitement et de rejet ;
- L'utilisation maximale du contenu énergétique des concentrés sulfurés ;
- Les émissions dans l'air :

Elles proviennent des opérations de stockage, de manutention, de traitement préliminaire et des phases de pyroméallurgie et d'hydroméallurgie. Les transferts de matière occupent une place particulièrement importante. Les données fournies ont confirmé que la part des émissions fugitives est très grande dans de nombreux procédés et que ces émissions peuvent être beaucoup plus élevées que celles qui sont captées et traitées. Dans ces situations, il est possible de réduire l'impact sur l'environnement, en suivant la hiérarchie des techniques de captage pour les gaz émanant des stockages et manutentions de matières, des réacteurs ou des fours et des points de transfert de métal. Les émissions fugitives potentielles doivent être prises en compte à toutes les étapes de l'étude et du développement du procédé. La hiérarchie de captage, pour les gaz émis dans chacune des phases du procédé, est la suivante:

- optimisation du procédé et minimisation des émissions ;
- emploi de réacteurs et de fours étanches;
- captage ciblé des fumées.

Le captage des fumées en toiture du bâtiment des fours est grosse consommatrice d'énergie et doit être un dernier recours.

Les valeurs des émissions associées, indiquées ensuite, sont des moyennes journalières établies sur la base d'une mesure continue sur la journée de fonctionnement. Lorsqu'une mesure en continu n'était pas réalisable, la valeur indiquée est la moyenne sur la période de



prélèvement. Les valeurs sont données en conditions normalisées: 273 K, 101,3 kPa, teneur en oxygène mesurée et gaz secs sans dilution des gaz.

Le captage du soufre est une exigence essentielle lorsque des minerais ou des concentrés sulfurés sont traités par grillage ou fusion. Le dioxyde de soufre produit par le traitement est capté et peut être valorisé sous la forme de soufre, de gypse (s'il n'y a pas d'effets multimilieus) ou de dioxyde de soufre ou encore transformé en acide sulfurique. Le choix du procédé dépend de l'existence de débouchés locaux pour le dioxyde de soufre. Les deux filières de production d'acide sulfurique, à savoir dans une unité à double contact avec un minimum de quatre passes ou dans une unité à simple contact avec production de gypse à partir des gaz de queue avec utilisation d'un catalyseur moderne, sont considérées comme des MTD. La configuration de l'unité dépendra de la concentration du dioxyde de soufre dans les gaz produits lors du grillage ou de la première fusion.

## 2.2. Opérations de séparation de phases en pyrometallurgie [1]

Les opérations de séparation de phases sont à la base des procédés industriels et sont conçues à partir des données théoriques de la physique, de la chimie et du génie métallurgique. La tradition et l'économie jouent aussi un rôle dans l'établissement des opérations ainsi que la qualité des produits obtenus. D'une façon générale, il est rare que



## **I) Pyrométallurgie**

### **1. Introduction :**

Durant ce dernier quart de siècle, la pyrométallurgie, en tant qu'opération thermique d'extraction des métaux, a été soumise à des contraintes qui, au cours de son histoire, ne s'étaient pas affirmées de façon aussi éclatante. Le coût élevé de l'énergie lors des chocs pétroliers des années 1970-1980, la nécessité de réduire les émissions préjudiciables à l'environnement, ont été de puissantes motivations pour modifier les stratégies et les techniques. Bien que la même période ait connu des développements importants en hydrométallurgie, qui regroupe les opérations par voie humide, la voie ignée et les procédés de raffinage associés restent encore la voie royale pour extraire les métaux. En effet, les vitesses de réactions sont assez élevées pour qu'elles ne constituent pas un paramètre limitatif majeur, les temps de séjour dans les appareils sont généralement assez courts et les réactions aboutissent à leur terme par suite de l'importante énergie d'activation inhérente au procédé thermique.

De plus, par transfert de technologie et adaptation à la protection de l'environnement, le traitement thermique constitue une voie très efficace pour valoriser ou rendre inerte des déchets solides d'origines industrielle ou domestique.

En ce qui concerne les déchets de la pyrométallurgie elle-même, tels que gaz, poussières, scories, écumes, et leur impact sur l'environnement, les habitudes traditionnelles sont bouleversées par la nécessité de valoriser une partie d'entre eux, soit par recyclage à l'intérieur des appareils pyrométallurgiques, soit par des procédés basés en général sur des techniques séparatives. Il n'en demeure pas moins que les émissions gazeuses et la pollution des sols au voisinage des usines métallurgiques constituent la contrainte majeure actuelle. Malgré le profit apporté par la transformation partielle des déchets en produits marchands, les contraintes environnementales sont devenues très lourdes à supporter par les métallurgistes, techniquement et financièrement.

### **2. Opérations de séparation de phases en pyrométallurgie :[1]**

Les opérations de séparation de phases sont à la base des procédés industriels et sont conçues à partir des données théoriques de la physique, de la chimie et du génie métallurgique. La tradition et l'économie jouent aussi un rôle dans l'agencement des opérations ainsi que la qualité des produits obtenus. D'une façon générale, il est rare que



l'on obtienne par une seule opération la qualité requise ou le rendement optimal. Certaines opérations, comme le convertissage, la métallurgie sous vide, la distillation, sont à la fois des opérations d'extraction et de raffinage. Les appareils relatés dans ce paragraphe sont les plus communs dans la partie relative aux exemples de la pyrométallurgie.

## **2.1. L'agglomération :**

### **2.1.1 Technologie de l'agglomération :**

La plupart des procédés d'extraction exigent que le minerai se présente sous forme agglomérée, ce qui augmente sa résistance mécanique (résistance à l'écrasement).

A cet effet, on peut procéder à deux types d'opération :

- le briquetage ;
- le frittage :

#### **a)- Le briquetage :**

Les poussières (ou bien les fines), auxquelles on ajoute un liant (chaux, chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ , chlorure de magnésium  $\text{MgCl}_2$ ), sont façonnées en briques séchées par la suie dans des fours. Les convertisseurs Dwight-Lloyd fournissent également des minerais sulfurés sous forme de briques.

#### **b)- Le frittage :**

Les poussières (ou bien les fines) sont chauffées à environ  $1000^\circ\text{C}$ , de façon à ce qu'elles prennent l'état pâteux et adhèrent les unes aux autres. On obtient ainsi des solides poreux.

Les avantages du frittage sont les suivants :

1. possibilité de récupérer les poussières (ou fines) ;
2. amélioration de sa résistance mécanique ;
3. amélioration du rendement de la méthode de réduction ;
4. il augmente les surfaces de contact entre le solide à réduire et le réducteur, qui est en général un gaz, impliquant des surfaces de contact très grandes.

Le frittage peut-être effectué dans des fours Dwight-Lloyd. On ajoute du carbone aux poudres, celui-ci servant de combustible. Quelque fois, on ajoute un peu de fondant, afin de faciliter l'opération d'agglomération.



### 2.1.2 Nature du procédé et champ d'application de l'agglomération :

L'agglomération fait appel à des procédés de mise en blocs de matières premières minérales, dans le processus duquel, on obtient des blocs (briques) de forme bien définie géométriquement, de mêmes dimensions et poids. L'objectif principal de l'agglomération consiste à :

1- attribuer aux matériaux meubles, fins et faiblement structurés, une forme de blocs stables, afin d'avoir la possibilité de les utiliser de la manière la plus effective et rationnelle ;

2- concentrer dans un volume minimal le maximum de composants utiles d'un matériau donné.

L'agglomération s'est propagée dans l'industrie du combustible industriel pour la mise en bloc des charbons, de tourbe et des rejets calorifiques.

Avec l'évolution considérable de l'extraction du charbon, il a fallu propager les travaux miniers à ciel ouvert et les procédés d'extraction souterraine à fort rendement, avec la particularité caractéristique concernant un rendement élevé (atteignant 60%) en fines, avec une granulométrie variant de 0 à 6 mm.

L'agglomération a trouvé et trouve application dans l'industrie de la métallurgie extractive (minérale), et particulièrement dans les cas, lorsque le tout-venant, en se rapportant à ses propriétés physiques et d'après le procédé de son affinage, ne peut se soumettre immédiatement à la fusion, et de ce fait doit, préalablement être mis en bloc.

Le briquetage, à l'heure actuelle, s'est alors orienté vers l'agglomération. La position créée fut issue :

1. d'une économie négative de la mise en bloc par briquetage au moyen de presses peu puissantes, possédant ainsi et comparativement un rendement limité ; en même temps, comme pour l'agglomération, on construisit des machines d'agglomération à bandes puissantes (2000 tonnes d'agglomérés et plus par jour), avec un taux élevé de mécanisation des processus industriels ;

2. par la possibilité dans le procédé d'agglomération, de séparer simultanément pour les impuretés (S, As, Zn, et autres), et obtenir un aggloméré sous forme scorificatrice (agent fondant).

Cependant, indépendamment des avantages cités, l'utilisation de l'agglomération pour la mise en bloc des minerais n'est pas toujours effective et rationnelle ; dans la série des cas, le



briquetage peut remplacer avec succès l'agglomération.

Hormis cela, sur le plan technologique et économique de la protection, le briquetage par comparaison avec l'agglomération présente une série d'avantages, entre autres :

1. les briques possédant le même forme exacte et le même poids, dans un volume donné elles contiennent plus de métal ; elles possèdent une plus grande résistance et une meilleure aptitude au transport, ce qui est particulièrement important, lorsque la briqueterie est éloignée de l'utilisateur (usine métallurgique) ;
2. les briques possèdent un poids spécifique plus élevé (3,4 - 4), ce qui est excessivement important pour la production en four « Martin » ;
3. la quantité de produit de retour à l'usine d'agglomération est d'environ de 20 à 25, mais parfois plus de l'ensemble du flux de la charge (lit de fusion), alors qu'à la briqueterie elle est d'environ de 2 ;
4. tout l'oxygène du minerai dans la brique demeure actif : dans l'aggloméré, il se trouve à l'état de liaison (sous la forme de silicates), ce qui est important pour toute production par haut-fourneau ;
5. les conditions sanitaires de l'usine de briques sont meilleures.

Dans la métallurgie ferreuse, le briquetage peut-être utilisé avantageusement pour la préparation des minerais, alimentant les ateliers « Martin » et haut-fourneau et l'électrofusion.

On utilise actuellement le briquetage dans le procédé par convertissage.

Dans la métallurgie non ferreuse, où la mise en bloc du tout-venant, dans l'ensemble des cas, se réalise par agglomération, le briquetage peut présenter certaines utilisations intéressantes :

Dans la métallurgie des métaux légers, avec le procédé sulfureux d'obtention de l'alumine, on citera le traitement rationnel des briques dans des autoclaves.

La charge par briques la plus effective :

1. à partir du kaolin, de l'alumine, du coke, avec la production de silico-aluminium et d'alpax (alliage) pour la fusion suivante dans un four électrique ;
2. à partir de l'oxyde chlorure de magnésium, de lignite (charbon brun), de tourbe et de chlorure de magnésium avec le procédé électrolytique de production de magnésium pour la



fusion ultérieure sous atmosphère chlorureuse, dans le but d'obtenir du chlorure de magnésium ( $MgCl_2$ );

3. à partir de la dolomite calcinée et du coke par le procédé carbo-thermique pour la distillation ultérieure, afin de produire du Magnésium ;

4. à partir de la dolomite finement broyée, du ferro-silicium et de la fluorine par le procédé silico-thermique pour la fusion réductrice ultérieure.

## 2.2 Grillage :

On appelle grillage toutes les transformations physico-chimiques des matériaux soumis à un chauffage, sans toutefois atteindre leur pleine fusion .On peut également indiquer que c'est une soumission des minerais ou concentrés aux effets simultanés de la température et du milieu ambiant, afin d'obtenir des produits valorisables et récupérables. C'est un procédé de préparation des minerais et concentrés pour les opérations métallurgiques ultérieures de fusion ou de lixiviation.

### 2.2.1 Les différents types ou modes de grillage :

En fonction du caractère des matériaux d'alimentation et des opérations métallurgiques ultérieures, on utilise les types suivant de grillage :

- a)-Grillage oxydant des matériaux sulfurés ;
- b)- grillage sulfatant ;
- c)- grillage chlorurant ;
- d)- grillage calcinant ;
- e)- grillage frittant ou agglomérant ;
- f)- grillage réducteur.

Le grillage a pour rôle d'éliminer sous forme gazeuse des éléments du minerai, autres que  $CO_2$  et  $H_2O$ , ou de transformer la matière afin d'appliquer, ensuite, des méthodes pyrométallurgiques ou hydrométallurgique selon une gamme étendue de combinaisons. On peut citer :

- le grillage des sulfures, qui donne du  $SO_2$  et des oxydes ;
- le grillage volatilisant, pour éliminer  $As_2O_3$ ,  $Sb_2O_3$  et  $ZnO$  et les récupérer



sous forme de fines particules condensées ;

- le grillage agglomérant, pour modifier les caractéristiques physiques d'un minerai;
- Le grillage sulfatant, chlorurant ou carbochlorurant, pour préparer un matériau à une phase hydrométallurgiques ultérieure ;
- le grillage magnétisant, ou réduction directe d'un oxyde, avant d'opérer une séparation minéralurgique.

À l'origine, on utilisait des fours verticaux à cuve, des fours tournants et des fours à soles multiétages. Des techniques nouvelles sont apparues.

Le grillage éclair, consiste à injecter le matériau dans le four avec l'air et le combustible, après un préchauffage. L'opération de grillage éclair est associée à l'opération de fusion.

Le grillage en lit fluidisé est utilisé pour améliorer les échanges thermiques solide/gaz, et notamment, dans le cas des sulfures, pour éliminer le  $\text{SO}_2$  en maintenant une basse pression partielle de  $\text{SO}_2$  autour des particules. Le réacteur Fluo-solid travaille en lit turbulent et peut fonctionner de façon autogène, si les réactions présentent une exothermicité élevée. Le combustible (charbon pulvérisé, fuel) est injecté dans le réacteur avec le concentré ou avec l'air. Les gaz sont traités pour éliminer  $\text{SO}_2$  et leur chaleur perdue peut être récupérée dans une chaudière. Pour éviter des températures trop élevées, soit on opère une aspersion d'eau dans le réacteur, soit on alimente avec des produits humides, soit on utilise un refroidissement des parois par circulation d'eau dans un double chemisage externe (Water jacket). On peut encore recycler les éléments les plus grenus et insuffisamment transformés du produit calciné.

Le grillage sulfatant est réalisé en lit fluidisé ou sur grille de type Dwight-Lloyd. La température doit être étroitement contrôlée pour que le métal reste sous forme de sulfate facilement lixiviable, alors que les autres éléments demeurent à l'état d'oxydes.

Dans le cas d'un grillage volatilissant tel celui de la stibine ( $\text{SbS}_2$ ), l'antimoine est oxydé sous une pression d'oxygène assez élevée pour obtenir  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  volatil, mais contrôlée pour éviter la formation de  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  peu volatil. Dans le cas du zinc contenu dans des scories de four à plomb,  $\text{ZnO}$  est volatilisé dans l'atmosphère du four puis réduit sur un lit de coke.



Enfin, le grillage chlorurant, peu utilisé industriellement, doit être strictement contrôlé tant au niveau des températures (certains chlorures étant volatilisés et d'autres pas) qu'au niveau de l'atmosphère du four, de la composition des gaz, de la pollution, de la corrosion.

### 3. Fusion :

D'une façon générale, on opère la fusion à des températures élevées et les séparations gravitaires obtenues dans le four ne peuvent être complètes. On recherche avant tout à éliminer les éléments indésirables dans les laitiers et scories, et les fumées.

Dans les fours verticaux, les opérations de réduction et de fusion sont associées : c'est le cas du séchage et du grillage réducteur de l'hématite dans un haut-fourneau, qui agit comme un producteur de gaz, le  $\text{CO}_2$ , réagissant avec le coke pour donner  $\text{CO}$  et l'atmosphère du four réagissant avec la charge lors de la fusion.

À l'inverse, dans les fours à réverbère, on évite de grouper les opérations de réduction et de fusion : les sulfures, dont un grillage préalable abaisse la teneur en soufre, sont fondus en présence d'un fondant, afin d'obtenir une matte enrichie en métal non ferreux. On évite l'oxydation poussée de la matte pour qu'il reste suffisamment de  $\text{FeS}$  afin de protéger les sulfures de l'oxydation. La fusion pour matte peut être aussi réalisée en four à cuve ou en four électrique pour éviter la production de gaz à faible concentration en  $\text{SO}_2$ , non valorisables et rejetés dans l'atmosphère comme c'est le cas avec les fours à réverbère classiques.

Dans les fours à réverbère modifiés, on souffle de l'oxygène à 90 %, où on opère sous une légère dépression dans le four pour obtenir des gaz riches en  $\text{SO}_2$  valorisables en acide sulfurique ou en soufre élémentaire ou en  $\text{SO}_2$  liquide. La conduite des opérations est rendue délicate, car un excès d'oxygène conduit à la formation de magnétite,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , dont il faut éviter la formation par un contrôle étroit des températures et de composition de l'atmosphère gazeuse.

Dans toutes les techniques de fusion, la température est généralement déterminée par la fusion de la scorie, qui doit s'écouler, plutôt qu'à partir du point de fusion du métal.

**Exemple :** pour l'étain, la température de fusion est celle de la réduction de l'étain dans sa scorie (1 150 à 1 200 °C) et non celle de la fusion du métal, qui est de 500 °C.

Enfin, la fusion peut être combinée avec la volatilisation comme c'est le cas avec



le procédé Imperial Smelting qui associe un four à plomb et un condenseur du zinc métal piégé par une pluie de plomb. Le plomb et le zinc sont séparés ensuite par liquation.

#### 4. Calcination :

Il s'agit d'un traitement thermique visant à la décomposition d'un minerai et à l'élimination d'un produit volatil,  $\text{CO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O}$ .

Les carbonates sont susceptibles d'un tel traitement, car leurs températures de décomposition sont peu élevées :  $850\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\text{CaCO}_3$ ,  $417\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\text{MgCO}_3$ ,  $377\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\text{MnCO}_3$ ,  $400\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\text{FeCO}_3$ . Les réactions sont endothermiques :  $-50\text{ kcal/mol}$  ( $1\text{ cal} = 4,184\text{ J}$ ) à  $900\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\text{CaCO}_3$ .

Les fabricants de chaux utilisent des fours de deux types, qui travaillent à plus de  $900\text{ }^\circ\text{C}$  selon le principe du contre-courant matière gaz chauds :

— des fours rotatifs de  $1000\text{ t/j}$  de capacité maximale pour des fines granulométries ; la consommation énergétique varie de  $1200$  à  $1300\text{ th/tonne}$  ( $1\text{ th} = 4,184 \cdot 10^6\text{ J}$ ) ; les pertes énergétiques sont importantes ;

— des fours verticaux, dont les plus récents ont une capacité de  $600\text{ t/j}$ , traitent des granulométries de  $15$  à  $150\text{ mm}$ , avec une consommation énergétique de l'ordre de  $800\text{ th/tonne}$ .

On opère aussi une calcination pour les minerais de phosphates soit pour éliminer la matière organique, soit pour éliminer la gangue carbonatée, dans des fours rotatifs, à lit fluidisé, ou à calcination éclair. Dans les opérations de décarbonatation, on est gêné par la formation d'anneaux, dans les fours rotatifs, ou de prise en masse, dans les fours à lit fluidisé. Les tonnages traités peuvent atteindre  $250\text{ t/h}$ .



### I.3 Types de four :

Un très large choix de matières premières est à la disposition des différentes installations et les procédés de production métallurgique mis en œuvre sont donc très divers. Très souvent en effet, ce sont les matières premières qui déterminent le choix du procédé. Les tableaux suivants énumèrent les types des fours utilisés pour l'élaboration des métaux non ferreux:

#### I.3.1 Fours de grillage, d'agglomération et de calcination : [14.k]

<b>Four</b>	<b>Métaux</b>	<b>Matières premières utilisées</b>
Sécheur à serpentin de vapeur Sécheur à lit fluidisé Sécheur flash	Cu et quelques autres	Concentrés
Four rotatif	La plupart des métaux devant subir un séchage. Vaporisation du ZnO. Calcination de l'alumine. Ni et ferroalliages. Brûlage de films photographiques pour production de métaux précieux. Déshuilage des déchets de Cu et d'Al.	Minerais, concentrés et déchets et résidus divers.
Four à lit fluidisé	Cuivre et zinc	Concentrés.
Appareil d'agglomération à flamme directe	Zinc et plomb.	Concentrés et matières premières secondaires.
Appareil d'agglomération à flamme inversée	Zinc et plomb.	Concentrés et matières premières secondaires.
Appareil d'agglomération à convoyeur métallique	Ferroalliages, Mn, Nb.	Minerais.
Herreshoff	Mercure, Molybdène	Minerais et concentrés.

<b>Four</b>	<b>Métaux</b>	<b>Matières premières utilisées</b>
Creuset fermé à revêtement réfractaire	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques
Four à creuset	Métaux réfractaires, ferroalliages spéciaux.	Oxydes métalliques
Baiyin	Cuivre	Concentrés
Four à arc électrique	Ferroalliages	Concentrés, minerai
Contop/Cyclone	Cuivre	Concentrés
Four à arc submergé	Métaux précieux, cuivre, ferroalliages.	Scories, matières secondaires, concentrés.
Four rotatif	Aluminium, plomb, cuivre, métaux précieux	Déchets et autres mat. secondaires, cuivre brut (blister copper)
Four rotatif basculant	Aluminium	Déchets et autres mat secondaires
Four réverbère	Aluminium, cuivre, autres	Déchets et autres mat. secondaires, cuivre noir
Vanyucov	Cuivre	Concentrés
ISA Smelt/Ausmelt	Cuivre, plomb	Produits intermédiaires, concentrés et matières secondaires.
QSL	Plomb	Concentrés et matières secondaires
KIVCET	Plomb Cuivre	Concentrés et matières secondaires
Noranda	Cuivre	Concentrés
El Teniente	Cuivre	Concentrés
TBRC TROF	Cuivre, Métaux précieux	La plupart des matières



<b>Four</b>	<b>Métaux</b>	<b>Matières premières utilisées</b>
Mini Smelter	Cuivre/plomb/étain	Déchets
Haut-fourneau et ISF	Plomb, plomb/zinc, cuivre, métaux précieux, ferromanganèse à haute teneur en carbone.	Concentrés, la plupart des matières secondaires
Four flash Inco	Cuivre, nickel	Concentrés
Four flash Outokumpu	Cuivre, nickel	Concentrés
Procédé Mitsubishi	Cuivre	Concentrés et déchets d'anode
Peirce Smith	Cuivre (convertisseur), ferroalliages, production d'oxydes métalliques	Matte et déchets d'anode
Hoboken	Cuivre (convertisseur)	Matte et déchets d'anode
Convertisseur flash Outokumpu	Cuivre (convertisseur)	Matte
Convertisseur Noranda	Cuivre (convertisseur)	Matte
Convertisseur Mitsubishi	Cuivre (convertisseur)	Matte

**I.3.2 Fours de première fusion : [14.k]**

<b>Four</b>	<b>Métaux</b>	<b>Matières premières utilisées</b>
à induction	La plupart	Métal de première fusion et déchets
Four de fusion à bombardement électronique	Métaux réfractaires	Métal de première fusion et déchets
Rotatif	Aluminium, plomb	Déchets de diverses nuances.
Réverbère	Aluminium (primaire et secondaire)	Déchets de diverses nuances.
Contimelt	Cuivre	Anodes cuivre, déchets neufs et cuivre blister
à cuve	Cuivre	Cathodes cuivre et déchets neufs
Tambour (Thomas)	Cuivre	Déchets de cuivre
Creusets chauffés	Plomb, zinc	Déchets neufs
Creusets à chauffage direct	Métaux précieux	Métal de première fusion



## II. Hydrométallurgie :

L'hydrométallurgie consiste en un ensemble de transformations chimiques et de processus physiques, effectués en solution aqueuse, permettant :

- ❖ Soit de séparer les constituants d'un minerai complexe ou d'un mélange intermédiaire, en général d'oxydes ;
- ❖ Soit d'extraire un métal à partir d'un oxyde ou d'un sel.

Les transformations chimiques consistent en des opérations de lixiviation (mise en solution ou dissolution sélective de constituant d'un mélange) et de précipitation, permettant soit une séparation physique des composés obtenus, soit par réduction de sels métalliques, afin d'obtenir le métal recherché. Ce sont des transformations mettant en jeu un composé solide, soit que l'on cherche à dissoudre dans une solution aqueuse, ou bien que l'on recherche à partir d'une solution aqueuse.

### II.1. Principes de l'hydrométallurgie :

L'hydrométallurgie consiste en une succession d'opérations chimiques caractérisées par la mise en solution d'un métal et son élaboration à partir de cette solution ; elle comprend principalement les étapes suivantes entrecoupées par des opérations de séparation solide/liquide.

La solution, après élaboration du métal, est, d'une manière générale, recyclée en lixiviation.

A ces opérations doivent s'ajouter, dans la plupart des cas, des opérations de prétraitement pour conditionner le métal sous une forme lixiviable ou pour le concentrer.

La **figure 1** décrit ces étapes principales.

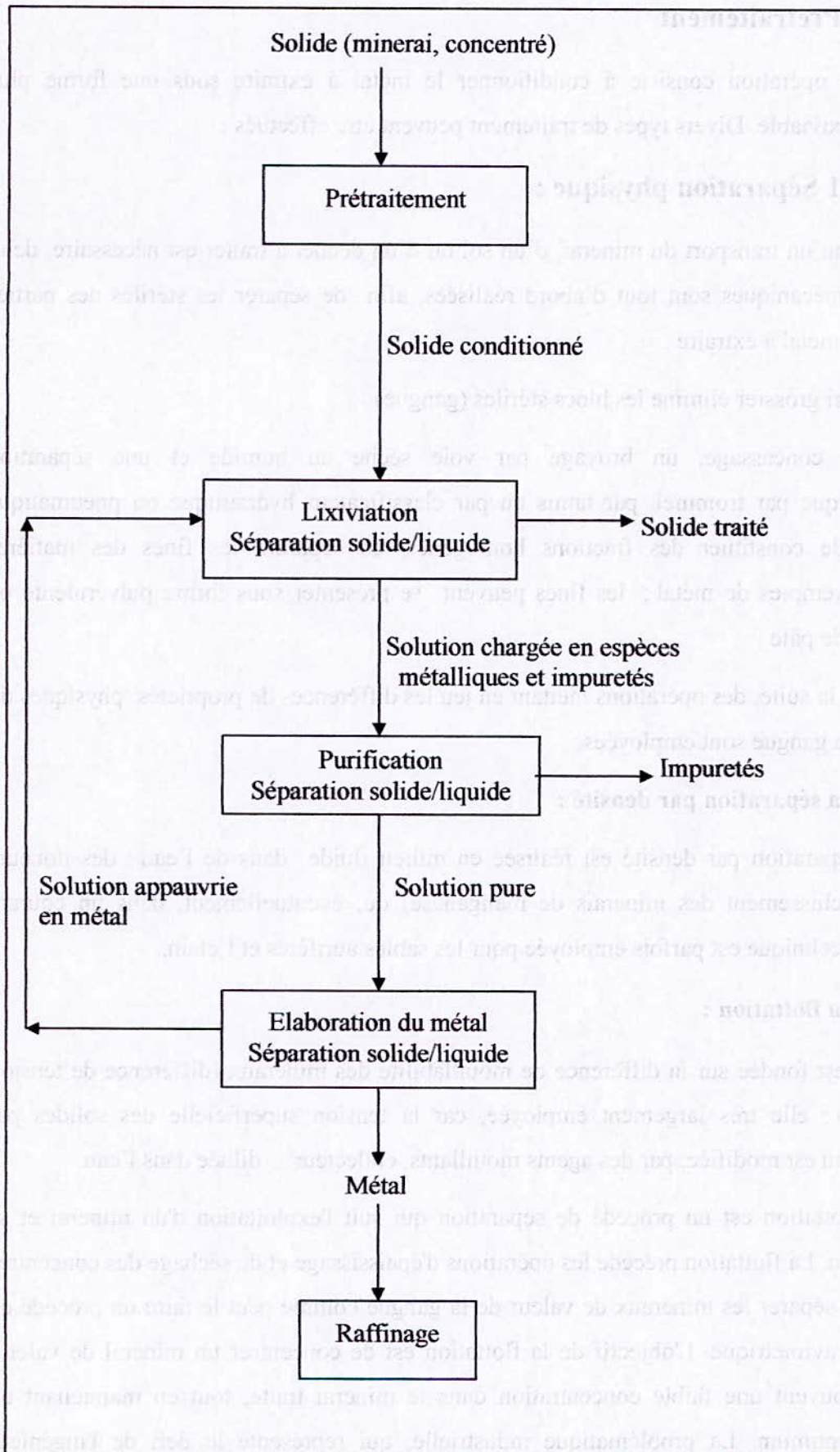


Figure1 : Schéma de traitement par hydrométallurgie. [11]



## II.2 Prétraitement

Cette opération consiste à conditionner le métal à extraire sous une forme plus facilement lixiviable. Divers types de traitement peuvent être effectués :

### II.2.1 Séparation physique :

Dès qu'un transport du minerai, d'un sol ou d'un déchet à traiter est nécessaire, deux séparations mécaniques sont tout d'abord réalisées, afin de séparer les stériles des parties contenant le métal à extraire :

- un tri grossier élimine les blocs stériles (gangue)
- un concassage, un broyage par voie sèche ou humide et une séparation granulométrique par trommel, par tamis ou par classificateur hydraulique ou pneumatique permettent de constituer des fractions homogènes, en séparant les fines des matières grossières exemptes de métal ; les fines peuvent se présenter sous forme pulvérulente ou sous forme de pâte

Par la suite, des opérations mettant en jeu les différences de propriétés physiques du métal et de la gangue sont employées.

#### 1.1 La séparation par densité :

La séparation par densité est réalisée en milieu fluide dans de l'eau ; des liqueurs denses (enrichissement des minerais de manganèse) ou, éventuellement, dans un courant d'air ; cette technique est parfois employée pour les sables aurifères et l'étain.

#### 1.2 La flottation :

Elle est fondée sur la différence de mouillabilité des minéraux (différence de tension superficielle) ; elle est très largement employée, car la tension superficielle des solides par rapport à l'eau est modifiée, par des agents mouillants, collecteur... diluée dans l'eau.

La flottation est un procédé de séparation qui suit l'exploitation d'un minerai et sa fragmentation. La flottation précède les opérations d'épaississage et de séchage des concentrés et permet de séparer les minéraux de valeur de la gangue comme peut le faire un procédé de séparation gravimétrique. L'objectif de la flottation est de concentrer un minéral de valeur, présentant souvent une faible concentration dans le minerai traité, tout en maintenant un rendement optimum. La problématique industrielle, qui représente le défi de l'ingénieur métallurgiste, est de déterminer les conditions opératoires qui vont permettre d'obtenir des

résultats en matière de récupération et de teneur, maximisant le rendement économique de l'usine.

### 1.3 La séparation magnétique :

La séparation magnétique est fondée sur le fait que le champ d'un aimant permet de séparer les matériaux ferromagnétiques (Fe) ou ferrimagnétiques (magnétite, titanomagnétite..), des matériaux paramagnétiques ( $\text{FeCO}_3$ ...)

### 1.4 La séparation électrostatique :

La séparation électrostatique est fondée sur la différence de conductivité électrique des minéraux.

## II.2.2 Lavage

Une opération de lavage à l'eau du solide à traiter permet de lessiver les sels solubles tels que ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ...).

Ces derniers peuvent, en effet, se concentrer dans la solution de lixiviation recyclée et perturber la lixiviation ou l'élaboration du métal en modifiant la viscosité de la solution.

Cette technique est souvent nécessaire dans le cas de traitement de déchets métalliques.

## III.3. Lixiviation

La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, le ou les métaux recherchés. Le but est de déterminer le type de lixiviat optimal en termes de consommation et de coût de réactif, de solubilisation minimale d'impuretés et d'entretien du matériel.

### 3.1. Agents de lixiviation (solvants)

En fonction du métal à extraire et du solide à traiter (impuretés présentes), différentes solutions de lixiviation peuvent être employées ; les plus courantes sont :

- L'eau ;
- Les acides ;
- La soude ;
- Des complexes ;



- Des solutions oxydantes ;
- Des solutions bactériennes.

#### a. L'eau

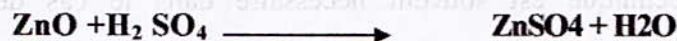
Elle permet de solubiliser les sulfates ( $\text{ZnSO}_4$ ) ou les chlorures formés suite à des opérations de grillage.

#### b. Les acides

- **Acide sulfurique :**

Du fait de son faible coût et de sa faible corrosivité, l'acide sulfurique est l'acide le plus couramment utilisé en tant qu'agent de lixiviation. Il limite ainsi les coûts de réactifs, d'investissement et d'entretien.

Il sert pour solubiliser les oxydes de zinc obtenus par grillage de blende et est, dans ce cas, généré lors du grillage selon les réactions :



Il trouve aussi de nombreuses applications dans l'hydrométallurgie du cuivre ( $\text{CuCO}_3$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), du nickel, du titane (ilménite  $\text{FeTiO}_3$ ) et de l'uranium.

Il présente, par contre, l'inconvénient de réagir avec les carbonates, le fer et la chaux, d'où une surconsommation de réactifs. Il ne permet pas d'extraire le plomb, métal souvent présent dans les déchets. Ses applications dans le traitement des déchets métalliques sont donc limitées.

- **Acide chlorhydrique :**

Du fait de son caractère corrosif et de son coût, l'acide chlorhydrique est peu employé. Il trouve cependant des applications dans :

- Le traitement des résidus de pyrite : extraction du cuivre, du nickel, du zinc et du plomb ;
- La lixiviation de minerais d'étain, de tungstène et de bismuth.

Dans certains cas, il est utilisé pour lixivier au préalable les impuretés présentes dans les minerais. Pour les minerais de tungstène ( $\text{CaWO}_4$  ou  $[\text{Fe}, \text{Mn}] \text{WO}_4$ ), l'acide

chlorhydrique dissout le calcium, le fer et le manganèse et produit de l'acide tungstique qui est traité, par la suite, par l'ammoniac.

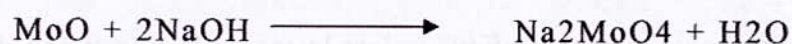
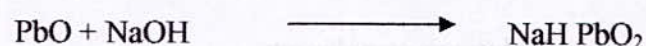
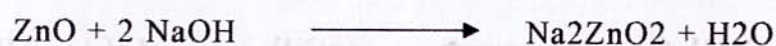
Il présente le désavantage de lixivier la chaux souvent présente dans les déchets, ce qui provoque une surconsommation de réactifs et une production importante de sels. Le traitement des phases gazeuses est aussi indispensable.

- **Eau régale :**

L'eau régale (mélange HCl et HNO<sub>3</sub>) est employée pour lixivier les minerais de platine à l'état natif.

**C. La soude :**

La soude permet de lixivier les métaux amphotères tels que l'aluminium, le zinc, le plomb, le thorium, les métaux de transition (molybdène, vanadium, tungstène, chrome) sous un état d'oxydation élevée.



Le degré de solubilité de ces métaux est fonction de la forme sous laquelle ils se trouvent.

**Exemple :** les hydroxydes, oxydes et carbonates de zinc sont très fortement solubles dans la soude ; les silicates et les sulfures sont, par contre, peu solubilisés.

L'emploi de la soude est cependant peu développé dans le traitement des minerais en raison des difficultés rencontrées lors de l'étape d'élaboration du métal.

**Exemple :** pour la production de zinc, le principal handicap provient de l'étape d'élaboration du métal par électrolyse qui produit de la poudre de zinc plus difficile à manipuler que le zinc massif formé par électrolyse en milieu sulfurique.

La soude présente toutefois de nombreux avantages grâce à son faible pouvoir de corrosion et à sa sélectivité. Le fer et le calcium, présents de manière quasi systématique dans les déchets, sont peu lixiviés. Un ajout de chaux dans une solution de soude permet de précipiter les silicates et les carbonates qui peuvent avoir été lixiviés et de régénérer la soude selon les réactions :





Au on de ces deux avantages, des procédés de traitement de déchets zincifères tels que les poussières d'aciéries électriques ou encore les boues d'hydroxydes métalliques sont en cours de développement.

#### d. Les complexes

De nombreux milieux composés d'un ou de plusieurs complexants peuvent être employés ; ceux décrits ci-dessous en sont les principaux.

- **Milieu ammoniacal**

Métaux tels que le zinc, le cuivre, le nickel et le cobalt forment des ions complexes solubles en milieu ammoniacal.

Ce milieu peut être composé d'un seul complexant. Le zinc donne, par exemple, des ions complexes solubles dans une solution de chlorure d'ammonium, selon la réaction :



Cela peut aussi être un mélange de plusieurs complexants :

- Soit pour extraire un métal spécifique : c'est le cas de la lixiviation du zinc dans une solution d'ammoniaque et de carbonate d'ammonium, selon la réaction :



Le nickel contenu dans des minerais latéritiques peut également être extrait par cette solution ;

- Soit pour extraire différents métaux. L'ajout de chlorure de sodium dans une solution de chlorure d'ammonium permet, par exemple, de solubiliser l'oxyde de plomb insoluble dans une solution de chlorure d'ammonium, suivant la réaction



Un procédé d'extraction du nickel, du cuivre et du cobalt présents dans les nodules des océans a été mis au point avec l'emploi d'une solution d'ammoniaque et de carbonate d'ammonium.

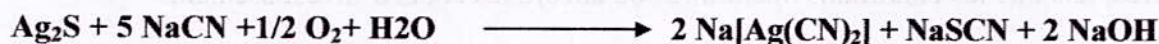
- **Milieu carbonate :**

Cette lixiviation est employée pour le minerai d'uranium, dans le cas où le traitement entraînerait des consommations excessives d'acide sulfurique. L'uranium donne des complexes solubles, selon la réaction :



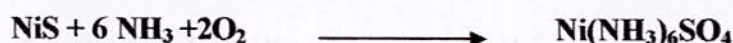
- **Milieu cyanuré :**

Les solutions de cyanure de sodium sont principalement utilisées pour la lixiviation de l'or, après grillage, et de l'argent. L'emploi de solutions peu concentrées en cyanures permet une séparation sélective des métaux du fait de l'affinité marquée du cyanure pour l'or ou l'argent.



**e. Solutions oxydantes:**

D'une manière générale, l'oxygène est employé comme oxydant pour le traitement de minerais sulfurés. C'est le cas des minerais de sulfure de nickel ou de sulfure de zinc selon les réactions :



L'ion ferrique sous forme de chlorure ferrique ou de sulfate ferrique peut être employé pour la lixiviation de sulfure de plomb ou de sulfure de cuivre :



**f. Solutions bactériennes:**

L'emploi de bactéries est adapté aux minerais pauvres ou complexes. Des applications dans l'hydrométallurgie du cuivre, du nickel et de l'uranium ont été mises en oeuvre. Les investissements sont peu coûteux, la consommation en réactif est faible. Par contre, les réactions sont lentes et doivent se dérouler dans le domaine d'existence des bactéries.



Quatre familles de bactéries sont principalement utilisées en hydrométallurgie pour l'oxydation de composés soufrés ou ferreux

- **Thiobacillus thiooxidans** : pour l'oxydation de composés soufrés ;
- **Thiobacillus ferrooxidans** : pour l'oxydation du sulfate ferreux ;
- **Ferrobacillus ferrooxidans** : pour l'oxydation du fer ferreux ;
- **Ferrobacillus sulfinitans** : pour l'oxydation du soufre et du fer ferreux.

De nouvelles applications pour le traitement de minerais de nickel sont actuellement en cours de développement.

### 3.2. Types de lixiviation :

La lixiviation peut être réalisée de quatre manières différentes en fonction de critères, tels que les conditions opératoires ou encore les coûts d'investissement.

#### ➤ **Lixiviation in situ :**

Cette technique est essentiellement employée pour le traitement des minerais de cuivre à très basse teneur en cuivre. Elle s'applique directement au minerai en place sans opération d'extraction ou de transport. Pour cela, il est nécessaire que le minerai soit très fragmenté pour assurer une surface de contact importante et qu'il soit isolé du réseau hydrographique pour empêcher toute contamination de ce dernier.

Elle consiste en un arrosage à l'eau en présence d'air ; il se produit alors une oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) qui forme du sulfate ferrique qui oxyde  $\text{CuS}$  en sulfate de cuivre. Ces réactions sont très lentes (plusieurs mois, voir plusieurs années); la solution est ensuite pompée en fond de mine.

#### ➤ **Lixiviation en tas :**

Le principe est le même que celui de la lixiviation in situ mais, cette fois, le minerai est extrait, concassé et mis en tas sur un sol étanche muni d'un système de collecte des eaux d'infiltration.

Cette opération peut être réalisée sur une aire naturelle si le milieu s'y prête ou sur une aire recouverte d'un revêtement étanche. La durée de la lixiviation est très longue (plusieurs mois) et variable selon la nature du minerai; les rendements d'extraction varient entre 50 et 90 %. Après épuisement du minerai, ce dernier est abandonné en l'état.



Le minerai peut aussi être mis dans des alvéoles, dont le fond joue le rôle de filtre. La solution de lixiviation est introduite au sommet, percole à travers le minerai et est clarifiée par filtre. Elle peut ainsi être recyclée directement afin qu'elle s'enrichisse. La durée de lixiviation varie, dans ce cas, de quelques jours à deux semaines ; cette technique s'applique généralement à des minerais plus riches que ceux concernés par la technique précédente.

➤ **Lixiviation en réacteur agité :**

Cette technique est la plus employée dans le cadre du traitement de minerais riches ou de déchets. Elle peut être réalisée en continu ou en discontinu, un contre-courant à plusieurs étages peut être mis en place. Le solide, sous forme pulvérulente, est mis en suspension dans la solution de lixiviation. La densité de pulpe est fonction du solide traité, du type de solution employé et de l'agitation (cette dernière permet d'accélérer les phénomènes de transfert et de diminuer le temps de séjour). Différents moyens d'agitation sont employés :

- Agitation mécanique par le biais d'agitateurs ou de turbines ;
- Agitation par barbotage d'air comprimé (idéale quand un apport d'air est nécessaire à la réaction) ;
- Agitation mixte mécanique combinée à l'insufflation d'air comprimé.

➤ **Lixiviation sous pression (en autoclave) :**

Cette technique est aussi couramment employée ; elle permet de travailler à une température d'ébullition supérieure à celle obtenue à pression atmosphérique, ce qui a pour effet d'améliorer la cinétique, les phénomènes de transfert ainsi que la filtrabilité du résidu.

Les autoclaves doivent pouvoir résister aux conditions de température et de pression qui peuvent atteindre plus de 200 °C et plusieurs mégapascals. Leur conception en acier inoxydable, en titane ou en alliages spéciaux leur permet de résister à la corrosion.

**Exemple:** la lixiviation en autoclave est employée pour le traitement de l'aluminium par la soude à 230 °C sous une pression de 3,3 MPa, du sulfure de nickel par l'ammoniac, du sulfure de zinc par l'acide sulfurique en présence d'oxygène.



## II.4. Séparation solide/liquide après lixiviation :

Cette étape permet de séparer le résidu inerte de la solution de lixiviation. Il est important que la séparation soit la plus complète possible, afin que :

1. La solution de lixiviation contienne, après séparation, le minimum de résidu, ce dernier représentant en effet une impureté pour la suite du procédé ;

2. Le résidu contienne le minimum de solution de lixiviation. Cela signifierait, dans le cas contraire, une perte de métal et une pollution du résidu. L'élimination de la solution de lixiviation du résidu est par ailleurs fondamentale dans le cadre du traitement de déchets. En effet, pour que ces derniers ne soient plus considérés comme des déchets ultimes et pour qu'ils soient banalisés ou recyclés, il est indispensable qu'ils soient débarrassés de leurs substances polluantes. Or les solutions de lixiviation et les métaux qu'elles contiennent sont considérés comme telles.

Trois techniques sont principalement mises en œuvre.

**4.1 La décantation** est la technique la plus employée ; elle permet un fonctionnement en continu des installations. Elle consiste en un déplacement dans un milieu fluide de particules solides sous l'action du champ de pesanteur. Elle nécessite des décanteurs de grand volume ainsi que l'ajout au préalable de flocculants ou de coagulants. Les particules sont extraites au fond des décanteurs sous forme de boues qui sont alors filtrées.

La décantation est une technique de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-floculation. Cette technique est très répandue dans les usines d'épuration et de traitement des eaux.

### a) Principe:

Lors de la décantation, les particules, dont la densité est supérieure à l'eau, vont avoir tendance à s'accumuler au fond du décanteur sous l'effet de la pesanteur. Les particules seront éliminées du fond du bassin périodiquement. L'eau clarifiée se situant à la surface du décanteur est ensuite réorientée vers un filtre.

### b) Paramètres de la décantation:

La vitesse de chute des particules est proportionnelle au diamètre, à la masse volumique (de la particule et du liquide) et à l'accélération de la pesanteur, tandis qu'elle est



inversement proportionnelle à la viscosité dynamique du liquide selon l'équation de « Stokes ».

$$V_p = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot d^2}{18\eta}$$

Avec:

g: accélération de la particule;

$\rho_p$ : masse volumique de la particule;

$\rho_l$ : masse volumique du liquide;

D: diamètre apparent de la particule;

$\eta$ : Viscosité dynamique de l'eau;

Les paramètres qui influencent la vitesse de la particule sont peu nombreux.

### c) Différents types de décantation:

- **décantation statique** : les particules sont considérées indépendantes et chutent selon leur propre vitesse. L'écoulement doit être laminaire sans turbulences. Le principe est que les particules atteignent le fond du décanteur.
- **décantation lamellaire** : On a disposé des lamelles par rapport à l'horizontale, pour avoir des décanteurs de faible surface, admettant de plus forts débits.

**4.2 La filtration** est effectuée en continu sur des filtres à bande ou en discontinu sur des filtres-presses. Cette technique est la plus appropriée pour éliminer la plus grande partie de la solution de lixiviation présente dans les résidus. La siccité (masse de matières sèches/masse totale) des gâteaux obtenus est parfois élevée (20 à 70 %) ; les gâteaux peuvent être lavés sur les filtres, afin d'extraire la solution de lixiviation contenue dans le liquide interstitiel des gâteaux.

**4.3 La centrifugation** consiste à appliquer aux particules en suspension un champ de forces centrifuges infiniment plus grand que le champ de pesanteur. Du fait du coût d'entretien élevé et des contraintes exigées par l'appareillage, cette technique n'est utilisée que si la décantation ou la filtration sont impossibles. Le procédé est très sensible aux variations des conditions opératoires (température, type de particules...). Un ajout de flocculant avant centrifugation est généralement nécessaire. La siccité excède rarement les 30 %.



## II.5. Extraction :

Le procédé permettant à un corps, se trouvant dans un solvant, de s'extraire par le biais d'un autre solvant, tout en ne se mélangeant pas avec le premier, porte le nom d'extraction.

Le solvant, dans lequel s'extrait le corps à partir de l'autre solvant, port le nom d'agent d'extraction. L'extraction permet de séparer des mélanges complexes, comportant plusieurs constituants (composant). Dans la série des cas, cette séparation apparaît de manière plus effective et plus rapide que les autres méthodes (par exemple échangeuse d'ions). Dans le cas du procédé d'extraction en hydrométallurgie, la solution aqueuse de sels de métaux entre en contact avec le liquide organique peu soluble dans l'eau, extrayant des métaux définis à partir de la solution initiale.

La réextraction suivants, de nouveau, permet d'extraire, à partir de la phase organique, le métal extrait dans une solution aqueuse.

L'efficacité du procédé d'extraction se caractérise quantitativement par un coefficient de répartition du métal à extraire, se déterminant par la relation suivante :

$$A=y/x$$

Où : y et x concentration équipondérante du métal, correspondant à la phase organique et aqueuse.

Pratiquement, le procédé par extraction peut être utilisé dans le cas d'un coefficient de répartition du métal supérieur ou égal à 0.3

Comme agents d'extraction, on utilise des amines, des cétones, des acides carboniques, des alcools, des éthers, des liaisons contenant du phosphore. Afin de diminuer la densité et la viscosité de l'agent d'extraction, et, de réduire sa perte, on solubilise les agents d'extraction (en les diluant) ; comme solvants (diluants), on utilise des hydrocarbures et leurs dérivés de chlore (le plus souvent l'essence, les mieux hydrogénés, un mélange d'essence et d'alcool décylrique ou octylique et autres).

L'agent d'extraction doit posséder par rapport au métal à extraire une faible solubilité dans l'eau, dans les solutions aqueuses acides et basiques, une stabilité dans les solutions aqueuses (ne s'oxyde pas, ne se réduit pas, ne s'hydrolyse pas), facilement se régénérer avec retour dans le cycle de l'extraction, avoir une viscosité et une densité peu élevées, se distinguer de la densité de la solution aqueuse (pour une meilleure séparation des phases lors



de l'agitation ou du mélange). Par ailleurs, l'agent d'extraction doit être faiblement volatil, ne doit pas être toxique, et être difficilement inflammable.

Les diluants doivent posséder une viscosité et une densité peu élevées, être peu coûteux et être peu dangereux dans le travail (ne pas être toxiques, inflammables).

L'extraction élevée ou pratiquement la pleine séparation du métal se réalise dans le cas d'un procédé d'extraction à contre-courant, quand cette opération est très répétitive.

Dans l'industrie, pour l'extraction, on utilise différents appareils :

- Mélangeurs ;
- Décanteurs ;
- Colonnes de remplissage ;
- Colonnes à plateaux avec pulsations ;
- Extracteurs centrifuges et autres.

La réextraction du métal se produit après séparation de la phase organique (agent d'extraction) de celle traitée et aqueuse par une solution basique ou acide, mais parfois seulement par de l'eau.

Dans le reextrait (ou extrait secondaire), on peut obtenir une concentration d'élément à extraire de plusieurs fois supérieures, que dans la solution initiale.

Les procédés d'extraction sont très utilisés dans l'industrie uranifère. Actuellement, leur domaine d'utilisation se développe. Ils sont utilisés pour l'extraction et la purification de beaucoup de métaux rares et de quelques métaux non-ferreux : nickel, cobalt, tantale niobium, et autres.

L'extraction et l'échange ionique peuvent se compléter l'un à l'autre, mais parfois se concurrencer l'un à l'autre. L'utilisation de ces méthodes permet de mettre en exploitation beaucoup de gisements pauvres de minerais.



### 5.1. Extraction liquide/ liquide:

C'est un procédé, qui sépare deux ou plusieurs constituants par utilisation de leur distribution inégale dans deux liquides pratiquement non miscibles.

En général, on met en contact intime la solution d'alimentation contenant les constituants à séparer (solutés), avec un autre liquide appelé solvant, extrayant préférentiellement un ou plusieurs des solutés.

Le solvant, qui contient le ou les solutés, est désigné sous le terme d'extrait. La solution d'alimentation, ayant perdu la majeure partie de ces mêmes constituants, porte le nom de raffinat.

En pratique, l'utilisation d'un procédé d'extraction liquide/liquide requiert deux opérations successives :

- Une mise en contact intime des deux liquides durant un temps suffisant à la réalisation de l'équilibre, le rapport des concentrations du soluté dans l'extrait et le raffinat, intitulé coefficient de distribution, donne une mesure de l'affinité relative du soluté pour les deux phases

- Après leur contact, une séparation ultérieure des deux liquides (extrait et raffinat).

Ce procédé ou cette méthode permet donc :

- D'isoler des espèces dans deux phases liquides différentes ;
- De purifier une espèce en l'extrayant sélectivement par un solvant donné, à partir d'une solution impure dans un autre solvant ;
- De concentrer une espèce dans un petit volume d'un solvant donné à partir de grands volumes de solutions diluées dans un autre solvant.

Ce procédé est actuellement le plus utilisé, surplissant la distillation, lorsque les conditions techniques ou physico-chimiques sont favorables, comme c'est le cas pour :

- ✓ La concentration d'un élément métallique, à partir des solutions d'attaque d'un minerai ;
- ✓ La purification de la solution concentrée obtenue ;
- ✓ La séparation et la récupération des éléments métalliques, présentant un intérêt économique ;



- ✓ La séparation des composés à forte différence de solubilité (traitements des combustibles nucléaires irradiés) ;
- ✓ La séparation des composés à températures d'ébullition voisines (séparation des hydrocarbures aromatiques et oliphatiques) ;
- ✓ La séparation d'azéotrope eau- minéraux ;
- ✓ La séparation de composés thermosensibles ou instables (production d'antibiotiques) ;
- ✓ La concentration et la purification des solutions diluées (opération souvent plus économique que distillation) ;
- ✓ La substitution à la cristallisation fractionnelle ;
- ✓ La séparation d'élément, présentant des propriétés chimiques voisines ;
- ✓ La production de produits de pureté.

L'industrie nucléaire fait un usage très efficace de ce procédé, car cette technique intervient dans le traitement du minerai d'uranium dans la séparation uranium-plutonium.

L'extraction liquide/liquide a trouvé plusieurs applications analytiques. On retrouve en effet en analyse le double problème de la concentration et de la séparation d'espèce chimique.

On peut avoir à analyser les espèces présentes dans une solution, présentant de très faibles teneurs, qu'aucune méthode d'analyse ne permette d'atteindre. Si l'on dispose d'un grand volume d'échantillons, on peut résoudre le problème, en transférant l'espèce à analyser dans un volume de solution beaucoup plus faible.

L'autre problème consiste en l'apparition d'interférences en analyse. Parmi les méthodes modernes d'analyse spectroscopique de plus en plus sélective, il arrive encore que deux espèces, de propriétés chimiques voisines, fournissent des réponses simultanées, qu'il n'est pas possible de les séparer.

Pour résoudre ces problèmes, on dispose de nombreuses méthodes, basées sur le partage possible d'espèces chimiques entre la phase liquide (ou gazeuse) à analyser, et une autre phase à analyser solide ou gazeuse mise en présence ou créer dans le système (précipitation, électrodéposition....). En analyse, les solutions à traiter sont des solutions diluées. De plus, la méthode permet de récupérer la totalité de l'espèce concernée.



Le domaine d'application de l'extraction liquide/liquide est très étendu, car on l'utilise pour éliminer d'une solution des espèces chimiques minérales ou organiques sous forme moléculaire ou ionique. Les performances de cette méthode sont intéressantes, car elle aborde efficacement le domaine des traces et microtraces (effet de Tenan) et les concentrations plus faibles encore.

## 5.2 Extraction solide/liquide :

L'extraction solide/liquide est l'opération fondamentale susceptible d'extraire, de séparer ou dissoudre, par immersion dans un liquide ou par arrosage par un liquide, un ou plusieurs composants (solide ou liquide) mélangés à un solide.

L'utilisation de l'extraction solide/liquide dans l'industrie minérale (hydrométallurgie) est très courante. On sépare fréquemment le produit utile de la gangue d'un minerai par dissolution dans des solutions d'attaques (alcalines, acides). On peut citer :

- Le cuivre est extrait des minerais à faibles teneurs (<1.5%) sous forme de sulfate par l'acide sulfurique en cuve par une solution de sulfate ferrique.
- L'or et l'argent sont isolés des minerais par dissolution dans une solution de cyanure de potassium.

Le champ d'application de l'extraction solide liquide étant très vaste, le grand nombre de vocables employés pour définir les opérations et les produits circulants impose la définition de quelques termes couramment utilisés.

Le liquide d'extraction, appelé solvant, dissout un composant cristallisé ou liquide, dénommé soluté, pour donner une solution ou extrait (solvant + soluté) et laisse un solide épuisé, appelé résidu.

### a) Processus de transfert de matière :

L'opération se déroule en trois étapes théoriques :

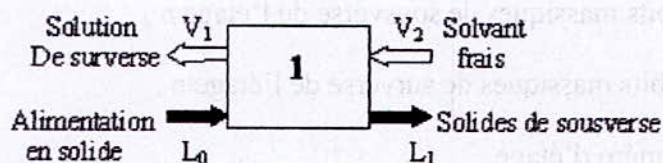
Le passage du soluté dans le solvant (ou dissolution), le lavage du solide par du solvant fais ou pauvre en soluté, et séparation mécanique du solide.

Le transfert du soluté dans le liquide est l'extraction solide/liquide. Ce transfert exige un certain temps pour être complet ; on détermine la vitesse d'extraction globale du phénomène, c'est la vitesse de transfert ou vitesse d'extraction.

**b) Méthode d'extraction solide/liquide :****🚦 Opération à étage unique ou par simple contact :**

Cette opération, représentée sur la (figure 2), est généralement incomplète en raison de la valeur élevée du temps de contact nécessaire pour épuiser totalement le solide de son soluté.

Cette opération est discontinue pour les opérations à petite échelle, la réalisation d'une extraction complète, ou très poussée, fait appel aux procédés à contacts multiples à courant parallèles, décrits ci-après .



**Figure 2 : Opération à étage unique ou par simple contact. [13]**

➡ Phase dispersée (solide) ;

⇐ Phase continue (liquide) ;

$L_0, L_1$  : débits massiques de sousverse ;

$V_1, V_2$  : débits massiques de surverse respectivement à la l'entrée et la sortie de l'étage.

**🚦 Opération à étage ou contacts multiples à courant parallèle :**

En associant des étages, on obtient une efficacité globale.

Deux cas limites sont possibles selon le mode de contact des deux phases :

**a) Opération à cocourant ou extraction (ou lavage) antiméthodique à cocourant :**

Si le contact des deux phases s'effectue à cocourant (figure 3), les deux flux de sortie sont en contact et, à la limite, pour un temps de séjour suffisamment long on peut avoir une cinétique de transfert suffisamment rapide, les compositions de ces deux flux sont en équilibre.



C'est la définition de l'étage théorique.

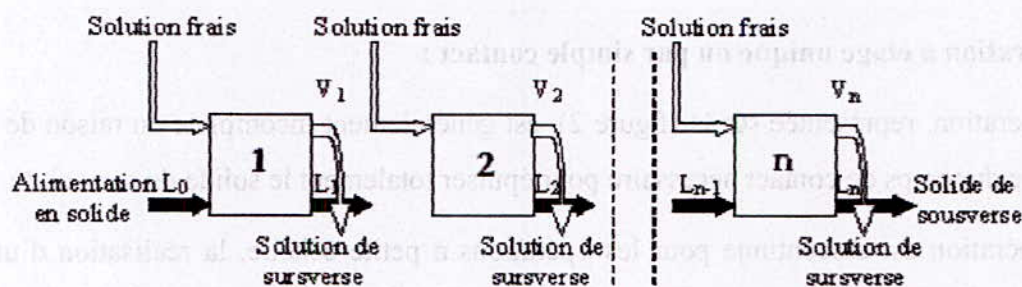


Figure 3 : Opération à étages multiples à cocourant. [4]

$L_n$  : débits massiques de sousverse de l'étage  $n$  ;

$V_n$  : débits massiques de surverse de l'étage  $n$  ;

$n$  : numéro d'étage .

**b) Opération à contre-courant ou extraction (ou lavage) méthodique à contre-courant :**

Si le contact entre les deux phases s'effectue à contre-courant (figure4), l'annulation de la vitesse de transfert à l'une des deux extrémités correspond à l'équilibre entre la concentration de sortie dans une phase et la concentration d'autre phase. Seul un contre-courant idéal permet d'obtenir la séparation complète.

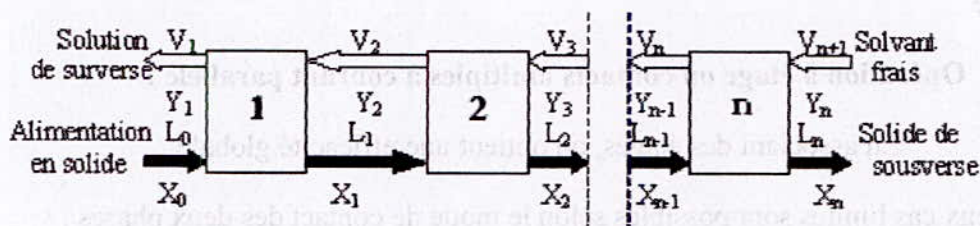


Figure 4 : Opération à étages multiples à contre-courant. [13]

$X_n$  : fraction massique de soluté dans la sousverse de l'étage  $n$  ;

$Y_n$  : fraction massique de soluté dans la surverse de l'étage  $n$ .

**b) Facteurs intervenant dans l'extraction :**

Ils sont liés à l'état du solide et du soluté, à la nature du solvant, à la température, au degré d'agitation des phases et à l'humidité.

### 1. Nature et état du solide et du soluté :

La nature et l'état physique du solide et du soluté ont une importance primordiale et déterminent le mécanisme de transfert de matière ; les solides à traiter se présentent sous forme de particules compactes de diverses grosseurs.

### 2. Nature du solvant :

Le solvant doit être sélectif, posséder une grande capacité de dissolution, une température d'ébullition peu élevée, une faible viscosité, non toxique, ininflammable et non explosif.

Les principaux solvants utilisés sont l'eau, les alcools, les hydrocarbures et les solvants halogénés.

### 3. Température :

L'élévation de la température permet généralement l'accroissement de la solubilité et de la diffusivité du soluté, la diminution de la viscosité de la solution.

### 4. degré d'agitation :

L'agitation mécanique des particules dans le solvant, qui permet leur maintien en suspension et l'homogénéisation du milieu, a un effet toujours favorable sur l'opération.

### 5. concentration résiduaire en soluté :

La vitesse d'extraction est inversement proportionnelle au taux de saturation  $\tau$  du solvant :

$$\tau = \frac{y}{y_s} \left( 1 - e^{-\left( D_d \cdot \frac{a}{\delta \cdot v} \right) \cdot t} \right)$$

Avec :

$y$  : concentration en soluté de la solution à l'instant  $t$  ;

$y_s$  : concentration en soluté de la solution saturée au contact des particules ;

$D_d$  : diffusivité en phase dispersée (solide) ;

$a$  : aire interfaciale par unité de volume ;

$\delta$  : épaisseur du film à l'interface des particules ;

$v$  : volume total de solution.



## 6. humidité :

Lors de l'utilisation de solvants hydrophobes, la diffusivité est inversement proportionnelle à la teneur en eau du solide.

Par exemple l'huile de tung dans l'hexane à 50°C présente les diffusivités suivantes :

- Pour un taux d'humidité de 0,0%,  $D_d = 7,48 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Pour un taux d'humidité de 15,2%,  $D_d = 2,28 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

## 5.3 Extraction par solvant :

L'extraction par solvant est une technique de séparation non destructive, qui utilise des solvants organiques pour solubiliser les contaminants organiques. Les solvants employés dans ce procédé sont soit non-critiques ou critiques. Un fluide aux conditions critiques est un fluide pour lequel la température et la pression thermodynamiques sont au point critique ou supérieures à ce dernier de manière à ce que ses propriétés, sa densité, sa viscosité, sa constante diélectrique et sa diffusivité sont intermédiaires entre celles d'un fluide gazeux et celles d'un liquide. Cette technologie diffère du lavage, du fait que l'extraction chimique utilise des solvants organiques ou des fluides critiques pour enlever la partie organique hydrophobe du sol, tandis que le lavage emploie de l'eau avec ou sans agents chimiques.

L'extraction chimique par les solvants est une technique de séparation, dont le but consiste à réduire le volume à traiter. Dans le cas de sols ou boues, ce procédé génère trois fractions: des sols propres pouvant contenir des métaux lourds adsorbés, de l'eau usée et un résidu contaminé dont le contaminant peut être extrait, détruit ou encore immobilisé.

Dans le but d'optimiser l'extraction des contaminants organiques, le solvant est choisi en fonction de la structure chimique du contaminant, du degré de contamination et des caractéristiques physico-chimiques de la matrice (boues, sols). Le solvant doit aussi être très soluble pour les contaminants, en plus, de posséder une bonne différence du point d'ébullition entre le solvant et le contaminant. L'efficacité de l'extraction chimique par les solvants dépend entre autres du type de matrice, de la grosseur des particules, de la teneur en eau, des concentrations et caractéristiques des contaminants, du taux de solvant et du nombre de cycles de contact. Cette technologie est applicable à presque toutes les contaminations générées par des produits pétroliers.



## II.6. La précipitation :

La précipitation des métaux, provenant de solution, se pratique par électrolyse, par cémentation, par réduction à l'hydrogène des liaisons jusqu'au métal, par décomposition des sels complexes, et enfin par cristallisation.

L'électrolyse est très utilisée dans l'hydrométallurgie du zinc, du cuivre, du cadmium et du manganèse. Elle est utilisée pour la récupération des métaux à partir de solutions purifiées, de même pour la production de métaux plus purs à partir des produits ferreux (électro-raffinage).

Durant la cémentation, la précipitation d'un métal de la solution, contenant ses sels, se réalise avec un autre métal plus électronégatif, si on se réfère à la série des tensions.

Par exemple, on cimente le cuivre par des copeaux de fer ou de bronze, l'or des copeaux de zinc, le cadmium par des poussières de zinc. On cimente les autres métaux dans différents appareillages à action périodique : dans des cônes, dans des tambours, dans des auges, dans des cuves, dans des bains et dans des appareils à lit fluidise.

On peut cimenter la série de métaux (nickel, cobalt, cuivre) à partir de solutions ammoniacales, en les réduisant jusqu'au métal par injection d'hydrogène sous pression. On précipite une partie de métaux sous forme de liaisons insolubles (hydroxydes, sulfures, et autres). Ainsi, par exemple, en considérant un certain pH, on peut séparer entièrement et pratiquement le molybdène du tungstène et le précipiter sous forme de sulfure.

Durant la cristallisation, la précipitation se réalise à partir de solutions concentrées, suite à l'évaporation ou au refroidissement de la solution, et au changement de pH du milieu. Ainsi, on extrait de la solution de sulfate de sodium lors du traitement des résidus de calcination de la pyrite par un grillage chlorurant et du sulfate de manganèse.

L'électrolyse, la cristallisation ou la réduction à l'hydrogène jusqu'au métal s'avèrent être le stade final de la précipitation.

## II.7. Electrolyse :

C'est la décomposition de l'électrolyte (dans la solution ou dans la bain fondu ou bien le métal fondu avec le passage de courant électrique le traversant), lié à perte ou bien au gain d'électrons réunis par des ions ou bien des molécules de corps solubles. Ainsi à la cathode, il se forme des produits de réduction à la suite de réunion pour effet l'obtention de produits d'oxydation.



Dans l'industrie chimique, l'électrolyse permet de produire un nombre important de métaux, également différents corps (Cl, O, H et quelques corps organique). On utilise l'électrolyse dans les méthodes de l'analyse quantitative (électro-analyse); on l'utilise également dans la technique galvanoplastique pour le dépôt de différents revêtements, pour la charge des accumulateurs.

### 7.1. La cellule d'électrolyse :

Les cellules de l'électrolyse industrielle (figure 5) comprennent : un récipient, des électrodes, éventuellement des diaphragmes et accessoirement un système de circulation de l'électrolyte. De plus, dans l'installation, il faut tenir cas du générateur de courant d'alimentation, de la distribution de ce courant, des connexions et des instruments de mesure. [13]

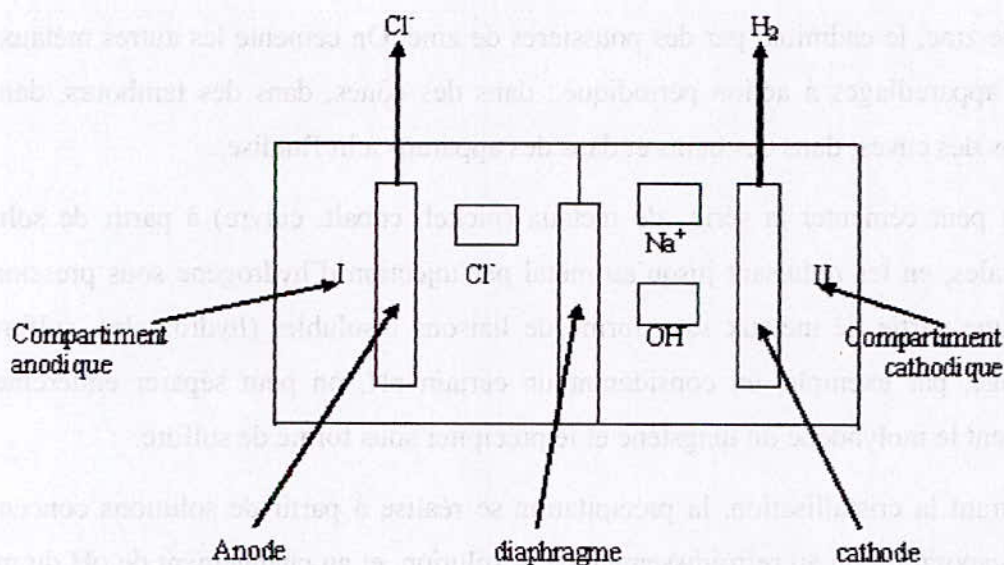


Figure 5 : Schéma de principe d'une cellule à diaphragme.

### 7.2. Bilan énergétique de l'électrolyse :

#### a) Production d'une cellule d'électrolyse :

Dans le cas d'une réaction électrolyse, par exemple, l'électrolyse de NaCl, la loi de Faraday exprime que : la masse  $m$  de métal déposé à la cathode est proportionnelle à la quantité de courant ayant traversé la cellule et à la masse atomique  $M$  du métal et inversement proportionnelle à la valence  $n$  de celui-ci :

$$m = \frac{M}{nF} I$$

**F** est appelé constante de Faraday :

$F = 26.8 \text{ A/h.mol}$  (**I** est exprimé en ampères et **t** en heures).

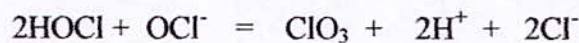
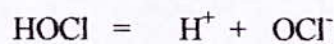
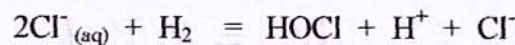
La production réelle sera inférieure à cette valeur. Le rapport de la seconde sur la première est le rendement de l'opération électrochimique, dont l'électrolyse du NaCl en chlore constitue la réaction principale.

Ce rapport, appelé rendement de courant ou rendement de Faraday, dépend donc exclusivement de l'importance des réactions secondaires ou parasites (et non des surtensions).

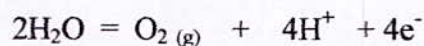
### b) Rendement de courant cathodique ou anodique

Le rendement de courant étant rapporté à la production théorique d'une espèce (chlore), il est clair que la cellule produit simultanément plusieurs produits (exemple : le chlore, la soude, l'hydrogène); il y aura trois rendements de courants différents, qui coïncident rarement.

Les réactions de formation d'acide hypochloreux et de chlorate :



La réaction d'oxydation de l'eau :



Industriellement ces réactions interviennent pour 4% environ dans la consommation de courant. Leur cinétique dépend de plusieurs facteurs :

- La nature de l'électrode ;
- La densité de courant ;
- La température de l'électrolyse ;
- La concentration de NaCl de l'électrolyse ;
- Le pH de l'électrolyse ;
- L'homogénéité des conditions aux électrodes ;

Les réactions secondaires cathodiques sont moins complexes : la principale correspond au passage à contre-courant d'ions  $\text{OH}^-$  à travers le diaphragme, qui, comme on peut s'y



attendre, augmente avec la concentration en NaOH de l'électrolyse, avec la réduction de la densité de courant, donc du débit d'électrolyte traversant le diaphragme, et bien sur, avec la perte des quantités du diaphragme dans le temps.

On définit le rendement Faradique par la relation :

$$R_F = \frac{m_r}{m_{th}}$$

$m_r$  : masse réelle du métal ;

$m_{th}$  : masse théorique du métal .

### c) Rendement énergétique

Le rendement énergétique  $R_w$  est défini par le rapport :

$W_r$  est l'énergie réellement utilisée pour effectuer l'électrolyse et  $W_{th}$ , l'énergie théoriquement nécessaire pour obtenir la même quantité de produit.

$$W_{th} = R_F V_{th} I$$

Et

$$W_r = V_r I$$

Avec

$V_{th}$  : différence des tensions d'équilibre entre les deux électrodes ;

$V_r$  : différence de potentiel aux bornes de la cellule.

On obtient :

$$R_w = R_F \frac{V_{th}}{V_r}$$

**d) Consommation spécifique**

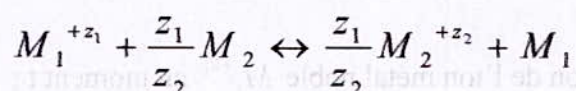
La consommation spécifique C est définie par :

$$C = \frac{W_r}{m_r} \quad [kwh/kg]$$

**II.8 Cémentation :****8.1 Réaction de cémentation :**

Les réactions de cémentation ont une grande importance industrielle :

- cémentation du Cu sur Fe métal ;
- cémentation de Au sur de la poudre ;
- cémentation du Cd (à partir de solution de sulfate de Zinc) sur Zn métal.

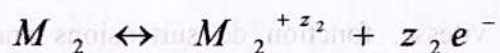
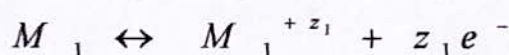
**Réaction de base :**

Où

$Z_1$  : valence du métal noble ;

$Z_2$  : valence du métal actif.

La réaction de cémentation peut être considérée comme étant deux réactions de demi-cellules :

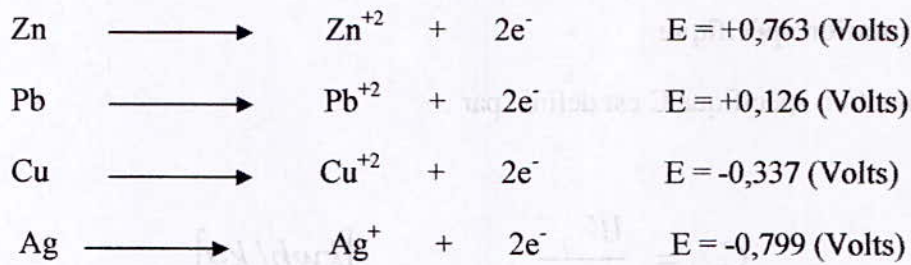


La plupart des réactions de cémentation montrent de fortes variations négatives d'enthalpie libre. Les variations d'enthalpie libre peuvent être calculées à partir des potentiels standard de demi-cellules.

**Par exemple :**

Potentiels standard de demi-cellules de la réaction :





## 8.2 Cinétique de la réaction de cémentation

A maints égards, la réaction de cémentation est analogue à l'électrodéposition.

Dans le système de cémentation, l'anode et la cathode sont court-circuitées, et la densité de courant est la plupart du temps contrôlée par la décharge des ions métalliques sur les sites cathodiques, due à un processus de diffusion. Une analyse détaillée des réactions de cémentation, en fonction de la théorie électrochimique, nous conduit à l'expression :

$$\frac{dC_1}{dt} = C_1 K_0 \left( 1 - \frac{C_2^{z_1/z_2}}{C_1} \exp\left(\frac{-z_1(E_2^\circ - E_1^\circ)F}{RT}\right) \right)$$

Avec :

$C_1$  : concentration de l'ion métal noble  $M_1^{+Z_1}$  au moment  $t$  ;

$C_2$  : concentration de l'ion métal actif  $M_2^{+Z_2}$  au moment  $t$  ;

$Z_1$  : valence de métal noble ;

$Z_2$  : valence de métal actif ;

$E_1^\circ$  : potentiel standard de demi cellule pour  $M_1$  ;

$E_2^\circ$  : potentiel standard de demi cellule pour  $M_2$  ;

$F$  : faraday ;

$K_0$  : constante de vitesse, fonction de surtensions anodiques et cathodiques, du potentiel de double couche, du coefficient de diffusion, de la distance de diffusion.

## 8.3 La pratique de la cémentation :

La pratique de la cémentation tient compte des conclusions précédentes. Elle se réalise dans des canaux, des cônes ou des tambours contenant les copeaux (scraps), sur lesquels le cuivre vient se déposer. C'est ainsi que l'on utilise maintenant des goulettes profondes,

munies de grilles, et à partir desquelles le ciment est pompé. Dans la plupart des opérations, la récupération dépasse les 90%.

Des problèmes se posent, lorsque le ciment forme des plaques encroûtées sur de gros morceaux de scraps.

Les tambours, dans lesquels la solution est mélangée avec le scrap, offrent une propension à susciter deux inconvénients extrêmes : à la fois des accrétions importantes, nécessitant un arrêt périodique et la fragmentation du ciment jusqu'à des dimensions colloïdales, permettant une bonne récupération dans les bassins de sédimentation et les épaisseurs.

Le traitement par cémentation, appliqué aux aciers, est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique (généralement 900 à 980 °C). Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe (Refroidissement rapide).

La recherche d'une dureté maximale conduit à obtenir des teneurs superficielles en carbone, comprises entre 0,7 à 0,9 % de carbone.

C'est le procédé de traitement superficiel qui est industriellement le plus utilisé.

## **II.9 La sorption (échange ionique) :**

C'est un procédé, parmi lequel les ions de la solution subissent une sorption par la surface des particules solides, s'extrayant avec elles de la solution. La sorption est basée principalement sur l'échange d'ions de particules solides en ions de même signe de la solution. Ce qui explique, que les particules solides utilisées dans ce procédé porte le nom d'échangeurs d'ions.

En fonction de la charge des ions échangeurs, ces corps se subdivisent en :

- échangeurs cationiques (le groupe actif possédant une charge négative) ;
- échangeurs anioniques (le groupe actif possédant une charge positive) ;
- il existe de même des échangeurs d'ions amphotères, « les ampholytes », aptes à effectuer en même temps un échange cationique et anionique.

En tant que sorbants, on peut utiliser des échangeurs d'ions minéraux (par exemple, différents aluminosilicates du groupe des zéolithes, de la montmorillonite, des ferroaluminosilicates, des glauconites), des échangeurs d'ions synthétiques non organiques



(permutites ou aluminosilicates hydratés artificiels) et des polymères synthétiques organiques macromoléculaires, souvent appelés : résines.

Actuellement, les résines échangeuses d'ions produites, possédant une grande capacité, une stabilité chimique et une dureté mécanique, prédominent par comparaison aux autres matériaux échangeurs d'ions.

L'échange ionique, qui a une place durant la sorption, ne doit pas être identifié avec l'adsorption. L'échange ionique représente en soi une substitution stoéchiométrique : sur chaque équivalent en ions absorbés, l'échangeur ionique rend à la solution l'équivalent de même signe. Ainsi l'adsorption représente une absorption sélective du corps solubilisé.

Les échangeurs d'ions secs à l'air, produits par l'industrie, sont composés de granules durs ou bien de produits de récupération, de dimensions variant entre 0,5 à 4 mm. Lorsqu'on les immerge dans de l'eau, ils gonflent. La vitesse de l'échange ionique se détermine par diffusion dans la granule de l'échangeur ionique (dans des solutions concentrées), ou bien par la vitesse de diffusion externe à travers le film de liquide, connecté à la surface de l'échangeur ionique (dans le cas de solution de faible concentration).

La sorption sans filtration est moins chère et simplifie le schéma du procédé échangeur d'ions, après que l'on ait éliminé la filtration préalable de la pulpe.

Pour la désorption suivante des métaux, à partir des échangeurs ionique –(élution), on utilise des solutions de différents réactifs : les nitrates d'aluminium ou de sodium, le chlorure de sodium, l'ammoniaque, la solution de soude, de carbonate de sodium, d'acides minéraux et autres.

Les éluats (solutions après désorption du métal des échangeurs ioniques) possèdent une concentration métal de 100 fois supérieures à celle provenant des solutions de tête (initiales)...

Par exemple, avec une concentration en molybdène dans la solution de tête de 0,2 à 0,3 g/l, on obtient des éluats pouvant contenir 80 à 100 g/l de métal (molybdène), c'est-à-dire, qu'il y a eu concentration de 300 à 500 fois.

Dans beaucoup de cas, la sorption des métaux se caractérise par des paramètres technologiques élevés. La capacité de l'échangeur ionique, dans le cas de l'uranium par exemple, varie de 30 à 50 Kg sur un mètre cube de résines à l'état de gonflement ; l'extraction du métal de solution peut atteindre 98 à 99,8 % d'uranium.



Dans le cas du tungstène et du molybdène, la capacité est élevée, atteignant 160Kg sur 1 m<sup>3</sup> d'anionite. La durée d'utilisation des sorbants à échangeurs d'ions, dans beaucoup de cas se détermine par leur diminution progressive de la capacité, suite à un empoisonnement partiel des échangeurs d'ions, à la formation de films inertes, à la destruction des groupes d'échangeurs, mais également au détriment des pertes mécaniques inévitables des échangeurs ioniques.

La sorption échangeurs d'ions, avec emploi de résines, permet de résoudre les problèmes suivants :

- a)- extraire sélectivement les métaux, à partir de solutions pauvres, et obtenir des solutions plus concentrées de ces métaux extraits ;
- b)- diviser ou sélectionner les éléments des métaux rares, proches de par leurs propriétés (zirconium, gadolinium et autres) ;
- c)- décontaminer les eaux stagnantes, en les purifiant des impuretés nocives ;
- f)- extraire les métaux, provenant des eaux de rejets industriels (effluents) ;
- g)- obtenir une eau très pure et adoucie.

Toute l'attention, reportée en hydrométallurgie pour la récupération des métaux à partir de solutions, s'adresse aux méthodes extractives.

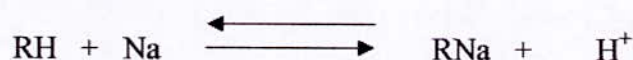
### 9.1 Classification principale, notion et terminologies :

Il n'existe pas de terminologie unique dans la pratique des polymères actifs chimiquement, caractérisant le plus leurs propriétés et processus échangeurs d'ions.

En se référant à la définition de « K, M.SALLADZE », les liaisons macromoléculaires solides et liquides, insolubles dans les solutions d'électrolytes et de solvants, possédant la conductibilité électrique et une aptitude réactive élevée au contact de corps chimiquement actif, sont des polymères chimiquement actifs. [13]

### 9.2 L'échange ionique :

C'est un échange d'ions entre deux électrolytes. En ne nous avançant pas sur la nature du mécanisme de l'échange ionique, on remarquera que le point de vue le plus répandu est une vue sur l'échange ionique, comme étant une réaction chimique hétérogène à double échange, de type :







R et R<sub>1</sub>- matrices respectives de l'échangeur cationique et de l'échangeur anionique.

Le trait, au-dessus des composants de la réaction, désigne la phase de l'échangeur d'ions.

L'échange ionique est un procédé chimique, présentant une certaine affinité avec l'adsorption (absorption), et le processus physique. Avec l'échange ionique, tout comme pour l'absorption, les réactions se produisent en deux phases.

### 9.3 Les matériaux échangeurs d'ions :

Naturels et artificiels, inorganiques et organiques, solides et liquides pratiquement insolubles dans l'eau et autres solvants, des polyélectrolytes, possèdent dans la structure des groupes ioniques spéciaux, aptes aux réactions d'échange d'ions, indépendamment de leur nature. Leur propriété caractéristique consiste en leur aptitude à échanger des ions de leurs groupes ioniques en ions d'un autre milieu.

### 9.4 Les résines échangeuses d'ions :

Artificielles macromoléculaires organiques, pratiquement insolubles dans l'eau et autres solvants polyélectrolytes, possèdent des propriétés échangeuses d'ions.

### 9.5 Les stades du procédé d'échange ionique :

On dénombre cinq stades :

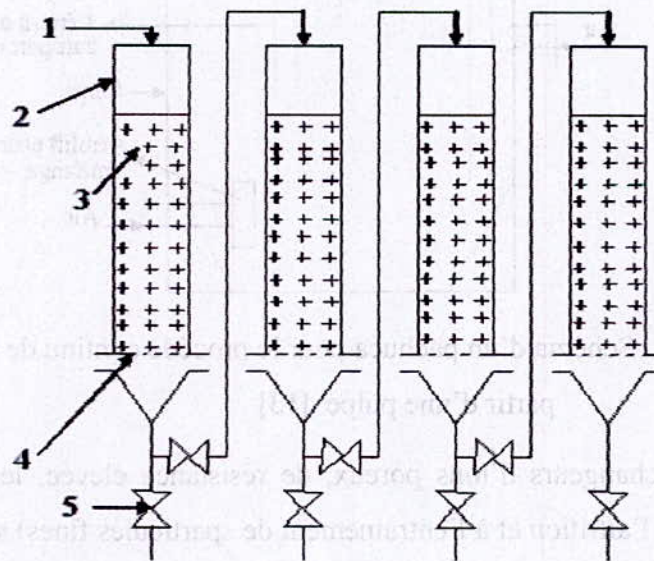
- 1- par diffusion des ions à la surface de la résine ;
- 2- par diffusion des ions à l'intérieur du grain ;
- 3- par échange « chimique » des ions ;
- 4- par diffusion de l'ion échangé de signe contraire dans le grain ;
- 5- par diffusion de l'ion échangé de signe contraire à la surface dans le volume de la solution.

Il a été établi, que la vitesse de l'échange ionique se détermine soit par la vitesse de diffusion de l'échangeur d'ions dans le grain (diffusion I), soit par la vitesse de diffusion à travers un film de liquide aboutissant à la surface (diffusion II par film).

Dans certains cas, les deux stades peuvent contrôler le procédé. Dans le cas de la plus grande partie des solutions concentrées ( $> \text{et} = \text{à } 0,1\text{M}$ ), la vitesse de l'échange se contrôle par diffusion dans le gain, et dans le cas de faibles concentrations par diffusion externe.

#### a) Echange ionique dans les colonnes :

En pratique, comme paramètre de travail, les vitesses du flux utilisent une grandeur par  $\text{M}^3$  de solution sur  $1 \text{ M}^3$  d'agent de sorption par heure. Dans la production, on réalise une sorption de l'ion à extraire, en introduisant la solution à travers quelques colonnes consécutives (Figure 6).



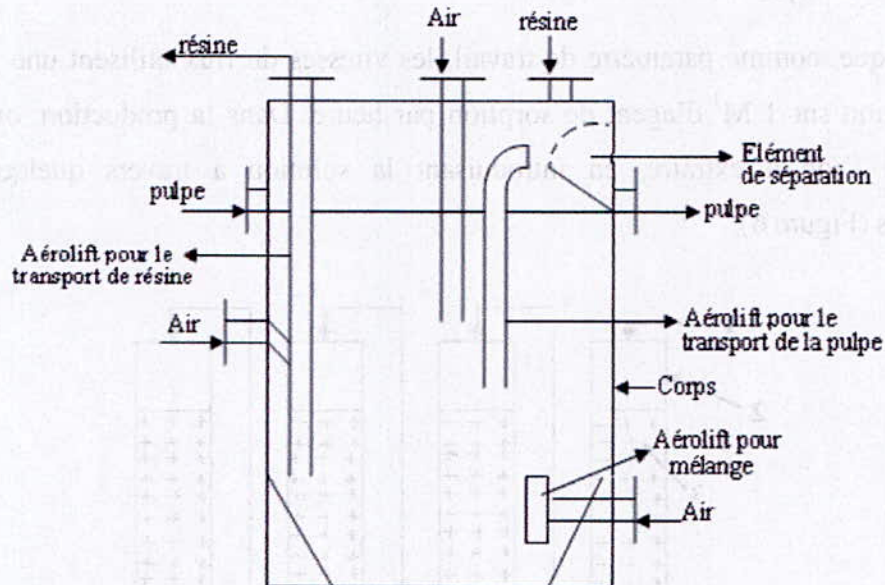
**Figure 6 :** batterie de colonnes pour l'extraction par échange ionique des métaux [13].

- 1- Solution de tête ;
- 2- Colonne ;
- 3- Résine échangeuse d'ions ;
- 4- Grille de drainage ;
- 5- Vannes pour le changement des flux.



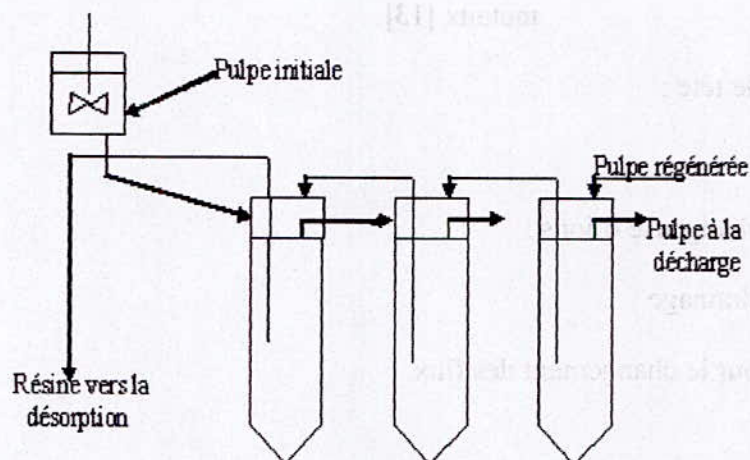
### b) Echange ionique à partir de pulpe :

La sorption se réalise à partir des pulpes (Solide : Liquide = 1 : 1) dans des appareils, avec agitation pneumatique et une alimentation par aérolift de résine et de pulpe (**figure 7**).



**Figure 7 :** Schéma d'un pachuca pour le procédé continu de sorption à partir d'une pulpe. [13]

En utilisant des échangeurs d'ions poreux, de résistance élevée, les pertes de résine (suite au broyage durant l'attrition et à l'entraînement de sparticules fines) s'élèvent à 30-150 g/tonne de matériau traité. Le schéma d'une cascade d'appareils de sorption, à partir de pulpes, est indiqué dans la **figure 8**.



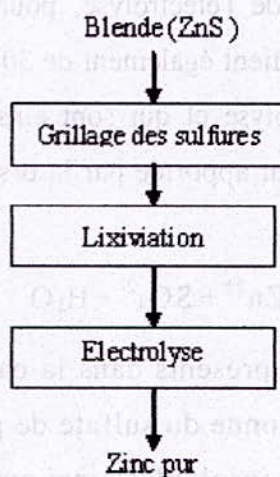
**Figure 8 :** Schéma d'une cascade d'appareils pour la sorption continue, à partir de pulpe. [13]

#### IV. Exemples des procédés métallurgiques de Zinc, de Plomb, et de Cuivre :

##### 1. Minerais de Zinc :

Le Zinc se trouve à l'état naturel sous forme de sulfure ou bien sous forme de composés oxydés, carbonatés ou silicates, qui résultent de l'altération des sulfures.

Citons comme principal minéral sulfuré :



**Figure 9** : Procédés d'élaboration du zinc

- **La blende** : sulfure de Zinc ( $ZnS$ ) de densité (3.5-4.5), titrant 67.1% de Zinc. Pour oxyder la blende, nous procéderons au "grillage à mort" au concentré de blende.

##### a) Grillage :

Il est réalisé par chauffage, à 900 - 1100°C, en présence d'air, selon la réaction :



Des réactions parasites sont susceptibles de se produire, principalement, la formation de sulfate selon des réactions qui ont lieu entre 500 et 600°C, le sulfate formé étant décomposé vers 900°C :



Lorsque le concentré est riche en fer, ce qui est souvent le cas, il se forme des ferrites, oxydes mixtes de zinc et de fer, selon la réaction :





Ces ferrites sont insolubles dans l'acide sulfurique dilué utilisé lors des opérations hydrométallurgiques et leur présence a longtemps été un obstacle à ces opérations.

La réalisation industrielle du grillage dépend des procédés métallurgiques de réduction utilisés par la suite.

### B) La lixiviation :

La calcine est attaquée par une solution diluée d'acide sulfurique (180 à 190 g/L). Cette solution est récupérée, à la fin de l'électrolyse, pour être recyclée en amont des opérations hydrométallurgiques. Elle contient également de 30 à 50 g/L d'ions  $Zn^{2+}$  qui n'ont pas été récupérés totalement par électrolyse et qui sont ainsi recyclés. La dissolution est effectuée vers 55 à 65°C, la chaleur étant apportée par la dissolution des oxydes. L'oxyde de zinc passe en solution selon la réaction.



Les autres oxydes métalliques présents dans la calcine passent également en solution, sauf l'oxyde de plomb qui donne du sulfate de plomb très peu soluble. Les métaux précieux, argent et or, restent insolubles ainsi que, en général, la gangue.

La dissolution de ZnO et des autres oxydes se traduit par une consommation d'acide et donc par une augmentation de pH. Cette dissolution dure de 1 à 4 heures et de 75 à 90 % du zinc passe en solution. Le zinc qui reste insoluble est celui qui, lors du grillage, a formé, avec l'oxyde ferrique, des ferrites. Ce zinc est récupéré par une opération complémentaire.

### c) Electrolyse :

L'électrolyse se déroule entre une cathode d'aluminium et une anode de plomb suivant la réaction :

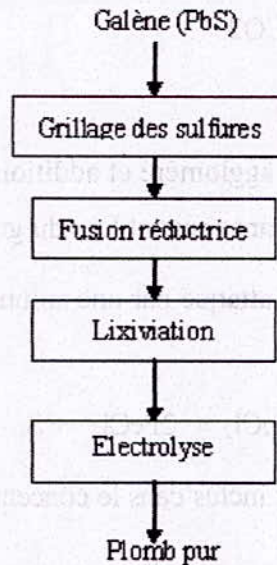


Les réactions élémentaires sont :

- à la cathode  $Zn^{2+} + 2 e \longrightarrow Zn$   $E^\circ = -0,76 V$
- à l'anode  $2 H_2O \longrightarrow O_2 + 4 H^+ + 4 e$   $E^\circ = +1,23 V$

## 2- Minerais de Plomb

Le principal est la galène (PbS) très souvent associée à la blende et la pyrite, mais il existe aussi d'autre minerai tel que, la cérusite (PbCO<sub>3</sub>) provenant de l'oxydation de PbS et présente dans les parties supérieures des gisements de galène.



**Figure10:** Procédés d'élaboration du Plomb.

**a- Grillage :** consiste à éliminer le soufre et agglomérer le concentré afin qu'il résiste à l'écrasement lors de la réduction. La charge obtenue doit être poreuse afin de permettre sa réduction par le monoxyde de carbone. Le grillage est réalisé vers 1000°C. SO<sub>2</sub> est récupéré pour produire H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La réaction principale est la suivante :



Le procédé le plus utilisé dans le monde consiste à effectuer le grillage sur des machines Dwight-Lloyd qui se présentent comme une bande sans fin de chariots mobiles munis de grilles, glissant sur des caissons étanches. L'air est soufflé à travers les grilles. Afin de décomposer PbSO<sub>4</sub> qui se forme au cours du grillage, la température de grillage doit dépasser 950°C. Lors du grillage il se forme également une faible quantité de plomb fondu, qui reste dans le concentré, selon les réactions :



La réaction de grillage étant très exothermique. Il faut éviter une teneur trop importante en combustible (PbS) qui entraînerait une élévation excessive de la température. Il ne faut pas atteindre 1114°C, température de fusion de PbS, ce dernier, à l'état fondu, ne



pouvant plus être grillé. Pour cette raison la teneur des concentrés qui est, comptée en soufre, de 10 à 14 % est réduite à une teneur moyenne de 6 % en ajoutant des concentrés préalablement grillés. Une partie du concentré grillé est donc recyclé en amont du grillage.

**b- Fusion Réduction :** par pyroméallurgie entre 500 et 1000°C.

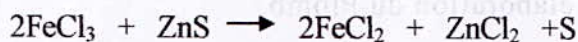


Avant réduction, le minerai est aggloméré et additionné de coke (180 kg/t de Pb) et de fondants, les ajouts de fondant intervenant souvent lors du grillage.

**c-Lixiviation:** Le concentré est attaqué par une solution contenant du chlorure ferrique et du chlorure sodium :



Les sulfures des autres métaux inclus dans le concentré sont plus ou moins dissous par les réactions :

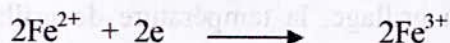


**d- Electrolyse:**

La solution purifiée est dirigée vers le compartiment cathodique d'une cellule d'électrolyse à diaphragme. Au contact de la cathode les ions  $\text{Pb}^{2+}$  se déchargent :



Le catholyte appauvri en plomb traverse alors le diaphragme pour entrer dans le compartiment anodique, où se produit l'oxydation des ions ferreux en ion ferriques :

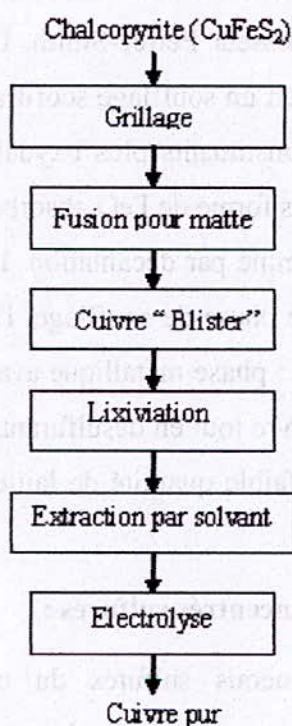


Ce qui permet de régénérer le réactif d'attaque. Le plomb se dépose alors sur la cathode, et est collecté sous forme de poudre, qui, une fois refondue, peut être ligotée. Le plomb ainsi obtenu titre à 99.99 %.

### 3- Minerais de cuivre :

La métallurgie du cuivre dépend de la composition du minerai.

On obtient donc ainsi directement du cuivre presque pur appelé « cuivre blister » (appelé ainsi à cause de l'aspect poreux qu'il présente). Cette caractéristique a amené au développement d'opérations très spécifiques de transformation des concentrés de sulfures.



**Figure11:** Procédés d'élaboration du cuivre.

#### ➤ **Pyrométallurgie: Obtention du cuivre « blister » :**

Elle comporte quatre opérations principales :

1. la flottation : elle produit des concentrés de teneur en soufre de 25 à 30%, en cuivre de 20 à 25 % sous forme de  $\text{CuFeS}_2$  et en fer de 25 à 30 % sous forme de  $\text{FeS}_2$ .
2. un grillage partiel vers 550 à 650 °C, dans des fours à soles multiples, ou en lit fluidisé, avec une quantité d'air limitée à la conversion d'une fraction du soufre, où se produisent les réactions :



A ces températures une partie du fer s'oxyde en magnétite :





3. la fusion-extraction dans un four électrique à électrode de pâte carbonée avec formation de deux phases liquides se séparant par gravité, un laitier à base de silice dans lequel se rassemblent la gangue résiduelle et les oxydes formés au cours du grillage et une matte (solution ionique de Cu, de Fe, de S).

4. la conversion de la matte à 1200°C par insufflation d'air ou d'air enrichi en oxygène se réalise dans un convertisseur Peirce-Smith. L'opération convertissage comporte deux phases. La première consiste en un soufflage scorifiant, avec élimination par oxydation et absorption par un laitier, des constituants plus oxydables que le cuivre. Le fer s'oxyde préférentiellement et totalement sous forme de FeO absorbé par le laitier, le soufre n'est oxydé que partiellement. Le laitier est éliminé par décantation. La matte résiduelle a une teneur en cuivre de 70%. Dans une deuxième phase de soufflage, l'oxydation du soufre est poursuivie avec obtention de cuivre « blister » : phase métallique ayant une teneur en soufre de 3% et à 1200°C. Pour limiter la perte en cuivre tout en désulfurant, la seconde phase de la conversion est réalisée en présence d'une très faible quantité de laitier, d'où le décrassage (élimination) intermédiaire du laitier.

#### ➤ Hydrométallurgie des concentrés sulfurés :

L'hydrométallurgie des minerais sulfurés du cuivre comporte trois opérations principales : lixiviation-séparation par précipitation des oxydes de fer et réduction des sels de cuivre par l'hydrogène ou par électrométallurgie.

✓ Une lixiviation sulfurique avec formation de sulfate de cuivre  $\text{CuSO}_4$  : cette opération est mise en oeuvre pour certains minerais pauvres directement sur des tas de minerai disposés sur des sols étanches, afin de récupérer la solution de sulfate de cuivre ou bien elle est réalisée en continu dans des cuves agitées mécaniquement ou par air. Les minerais oxydés sont très solubles, avec un rendement en cuivre dissous supérieur à 95%.

Le cuivre y est extrait, en donnant une solution suffisamment concentrée (50 g/l de Cu et 80g/l de  $\text{SO}_4\text{H}_2$ ) pour l'électrolyse.

# Partie application



## **I)- Introduction :**

Une base de données, BD en abrégé, est un ensemble structuré d'informations; elle offre la possibilité d'accéder facilement et rapidement à l'information recherchée.

La base de données, pouvant être plus au moins longue ou complexe, suit les capacités de l'ordinateur (capacité du disque dur) et du programme utilisé. [1]

Pour que notre application réponde à l'objectif tracé, nous allons suivre les étapes suivantes :

- Conception de l'application ;
- Traitement de données.

## **II)- L'outil de développement :**

L'outil de développement de notre application est Microsoft Access. Ce dernier est un SGBDR (système de gestion de bases de données relationnelles), permettant de gérer des données par domaine et d'établir des relations entre ces domaines.

### **II.1 Les objets d'Access :**

L'Access est un système basé sur le modèle relationnel, fonctionnant sur le même principe général : les informations sont stockées dans des tables, qui sont reliées entre elles par des relations. L'interrogation de la base de données se pratique à l'aide de requêtes ; ces requêtes sont exprimées à l'aide d'un langage commun à la plupart des SGBD (Système de Gestion de Bases de Données) : le SQL (Structured Query Languages). Access a comme avantage par rapport à la plupart de ses concurrents, de permettre une écriture en mode graphique des tables, de leurs relations et de la plupart des requêtes. De plus, il intègre un système de création d'applications claires et simples pour chaque base de données. [7]

#### **II.1.1 .Base de données :**

Sous Access, il s'agit de l'ensemble des objets composant une application, quel'on regroupe dans un même fichier, tel qu'on trouve des tables associées aux autres objets ; ou, en d'autre terme, dans le langage informatique SGBD, la base de données est généralement un ensemble de tables et un langage de programmation. [9]

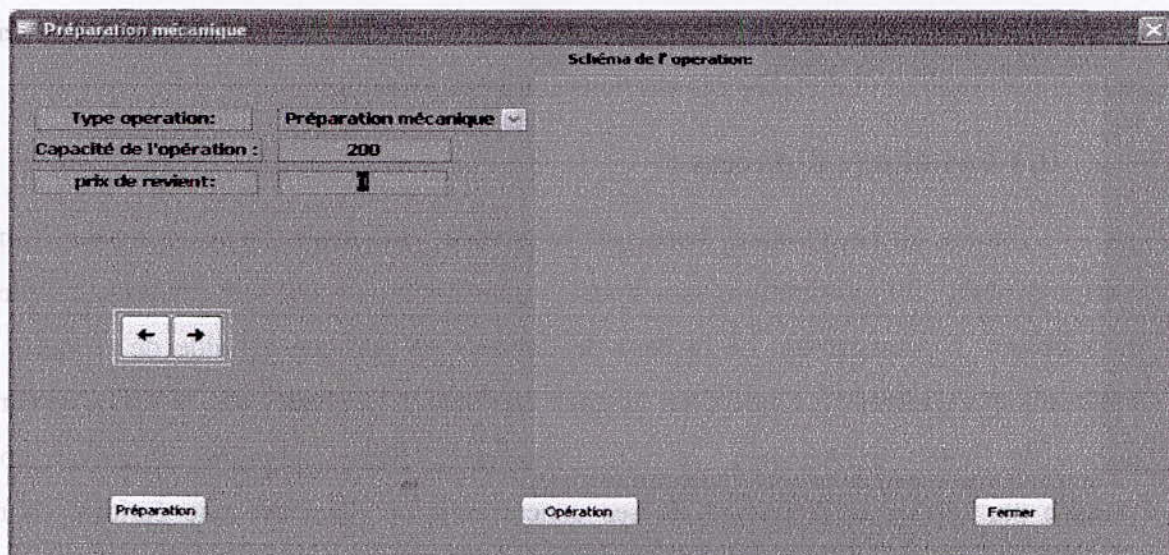


### II.1.2 Les tables :

Une table est un ensemble d'informations stockées sous forme de colonnes et de lignes. Une colonne représente un champ qui sera défini par son nom et son type ; une ligne représente un enregistrement ou une fiche. Les tables servent d'élément de base à la création d'autres objets Access, tels que les formulaires et les requêtes.

### II.1.3 Les formulaires :

Les formulaires sont des interfaces graphiques, permettant de présenter un ou plusieurs enregistrements par fiche, de façon à disposer les champs d'un enregistrement à travers l'écran (en générale, une fiche sur l'écran). On peut aussi utiliser un formulaire pour visualiser ou modifier des enregistrements déjà saisis, ou ajouter de nouveaux enregistrements. Lorsqu'on utilise un formulaire, Access extrait des données des tables et des affiches selon une disposition définie.



### II.1.4 Les états :

Un état permet de présenter les données dans le format le mieux adapté à leur exploitation et à leur diffusion. Un état peut comprendre un texte, des nombres, des images, des traits, des cadres et des graphiques. L'état est un moyen efficace pour l'impression d'informations stockées dans des tables ou extraites par requêtes. Il permet également de calculer et d'afficher des totaux pour tout un jeu d'enregistrement. Un état, comme un formulaire, est normalement lié à une source de données, qui peut être une table, une requête ou une instruction SQL de type Sélection ou Analyse croisée.



### II.1.5 Les macros :

Une macro est une action (succession d'opérations de base) ou ensemble d'actions, permettant d'automatiser des tâches, telles que l'ouverture d'un formulaire ou l'impression d'un état, ce qui rendra l'utilisation de l'application plus performante.

### II.1.6 Les modules :

Ce sont des programmes, qui permettent d'accomplir des tâches complexes, écrites en langage de programmation, en l'occurrence (Microsoft Visual Basique), dans le but d'automatiser un traitement sur la base de données.

Une application peut contenir plusieurs modules, composés chacun d'une section de déclarations et d'un ensemble de procédures.

### II.1.7 La requête :

C'est une structure permettant d'exprimer des opérations d'interrogation et de mise à jour de la base de données. Elle permet également de construire d'autres objets tels que les formulaires et les états.

Elle est décrite par :

- Les tables utilisées ;
- Les champ affichés ;
- Les liens entre les tables ;
- Les conditions (c'est-à-dire les expressions permettant de choisir les informations, qui sont traitées ou affichées) ;
- Les champs (ou expressions), selon lesquels se sont classés (triés) les information affichées.

## II.2 Clé primaire ou index :

La puissance d'un programme de toute base de données relationnelles provient de sa capacité à trouver et à réunir rapidement des informations stockées dans des tables.

A cet effet, chaque table doit inclure un champ ou un ensemble de champs, identifiant, de manière unique, chaque enregistrement stocké dans les tables. Cette information porte le nom de « Clé primaire » de la table. Une fois qu'on a désigné une clé primaire pour une table, « Microsoft Access » empêchera, pour en garantir le caractère unique, que des doublons ou des valeurs nulles ne soient introduites. Une clé primaire permet aussi d'établir les relations entre les tables ; une relation se définit toujours entre deux champs spécifiques d'une table. [1]

### II.2.1 Les types de relation :

On distingue trois types de relation : les relations « un à un », les relations « un à plusieurs », les relations « plusieurs à plusieurs ».

#### - les relations « un à un » :

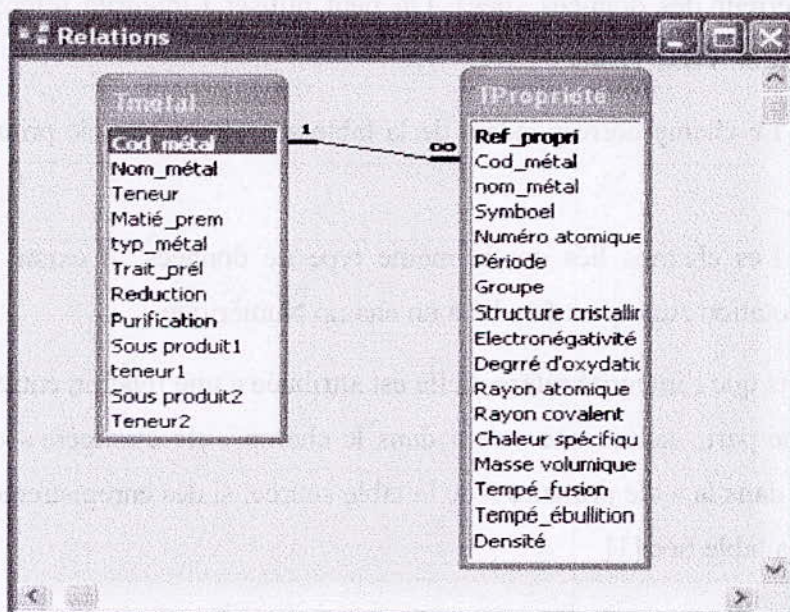
Dans ce type de relation, un enregistrement de la table source ne peut être relié qu'à un seul enregistrement de la table liée, et inversement. Les relations de type « un à un » sont rares, car dans la plupart des cas, on peut combiner les champs de deux tables en une seule table.

#### - les relations « un à plusieurs » :

Dans une base de données relationnelles, la relation « un à plusieurs » est la plus courante. Avec une relation de ce type, un enregistrement de la table source peut être lié à plusieurs enregistrements de la table liée ; cependant un enregistrement de la table liée ne peut être lié qu'à un seul enregistrement de la table source.

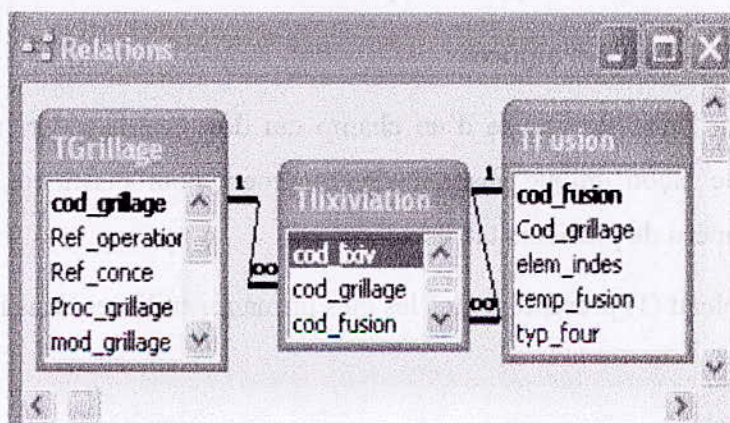


Pour établir la relation, on doit ajouter le champ (ou les champs) de la clé primaire de la première table (table source, c'est-à-dire, la table côté « Un » de la relation) dans la seconde table (table liée, c'est-à-dire, la table côté « Plusieurs » de la relation).



- **la relation « Plusieurs à Plusieurs » :**

Dans une relation de type « Plusieurs à Plusieurs », un enregistrement de la table source peut être relié à plusieurs enregistrements de la table liée, et inversement ; « Access », à l'instar des autres programmes, ne peut pas créer une relation de type « Plusieurs à Plusieurs ». Pour ce type de relation, on doit créer une nouvelle table (table intermédiaire), dans laquelle on placera des champs de la clé primaire des deux tables ; la création de la relation « Plusieurs à Plusieurs », entre la table source et la table liée, revient donc à créer deux relations de « Un à Plusieurs ». La première relation lie la table source à la table intermédiaire, alors que la seconde devrait lier la table liée à la table intermédiaire.





## II.2.2 L'intégrité référentielle dans les relations :

L'intégrité référentielle est un système utilisé pour garantir que la relation entre les enregistrements dans les tables liées soient valides, et, grâce à elles, on ne peut pas effacer ou modifier par erreur des données liées. On peut utiliser l'intégrité référentielle, si les deux conditions suivantes sont réunies :

- Le champ correspondant de la table source est une clé primaire ou possède un index unique.
- Les champs liés ont le même type de données. Il existe une exception : un champ Numérotation Auto peut être lié à un champ Numérique.

Une fois que l'intégrité référentielle est attribuée à une relation entre deux tables. On ne peut pas, d'une part, inclure une valeur dans le champ « clé étrangère » de la table liée, car n'existant pas dans la « clé primaire » de la table source, si des enregistrements correspondants existent dans la table liée.[1]

## III. Conception de l'application :

### III.1 Introduction :

Ce découpage nous a permis de répartir les informations, selon leur nature et leur dépendance. Ensuite, nous avons structuré notre base de données, de façon à ne pas avoir à la modifier par la suite, et finalement, nous avons déterminé les liaisons qui peuvent exister entre les tables.

### III.2 Description des tables :

Les tableaux suivants résument toute la conception, car contenant les champs élémentaires, sur lesquels s'appuie l'application.

#### III.2.1 Les clés primaires :

Chaque table est menée d'un champ qui doit être la clé primaire. Ce champ permet d'identifier de façon unique chaque enregistrement pour permettre ensuite le regroupement rapide de données de plusieurs tables.

Le tableau (1) présente toutes les clés primaires utilisées dans l'application.



Clé primaire	signification	Tables
Cod_métal	Code du métal	Tmétal
Cod_caract	Code de caractéristique du métal	Tcaract_métal
Cod_agglomération	Code de l'agglomération	Tagglomération
Cod_grillage	Code de grillage	Tgrillage
Cod_calcination	Code de calcination	Tcalcination
Cod_fusion	Code de fusion	Tfusion
Cod_four_fusion	Code de four de fusion	Tfour_fusion
Cod_four_ag_gr_ca	Code de four d'agglomération, de grillage et de calcination	Tfour_ag_gr_ca
Cod_lixiviation	Code de lixiviation	Tlixiviation
Cod_extraction	Code de l'extraction	Textraction
Cod_ech_ion	Code de l'échange ionique	Téch_ionique
Cod_électro	Code de l'électrolyse	Télectrolyse
Cod_décantation	Code de la décantation	Tdécantation
Cod_cément	Code de cémentation	Tcémentation
Cod_cal_con_spe	Code de calcul de consommation spécifique	Tconsom_spe
Cod_cal_ren_courant	Code de calcul du rendement de courant	Tren_courant
Cod_cal_ren_energ	Code de calcul du rendement énergétique	Tren_energ
Cod_cal_vit	Code de calcul de la vitesse	Tvit_décantation
Typ_app_extra	Type d'appareil de l'extraction	Ttyp_app_extraction

Tableau (1) : les clés primaires des tables.



### III.2.2 Les différents champs utilisés dans les tables principales :

#### Tmétal :

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code du métal	Cod_métal	NuméroAuto	4
Code de l'électrolyse	Cod_extraction	Numérique	4
Code de la cémentation	Cod_cement	Numérique	4
Code de l'échange ionique	Cod_ech_ion	Numérique	4
Dénomination du métal	Nom_métal	Texte	20
Teneur de produit principal (%)	Teneur	Numérique	4
Matière première	Matié_prem	Texte	40
type de métal	typ_métal	Texte	6
Traitement préliminaire	Trait_prél	Texte	40
Reduction	Réduction	Texte	60
Purification	Purification	Texte	60
Nom du sous produit1	Sous produit1	Texte	20
Teneur du sous produit1 (%)	teneur1	Numérique	4
Nom du sous produit2	Sous produit2	Texte	20
Teneur du sous produit2 (%)	Teneur2	Numérique	4

#### Tcaract\_métal

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de caractéristique du métal	Cod_caract	NuméroAuto	4
Code du métal	Cod_métal	Numérique	4
Dénomination du métal	nom_métal	Texte	20
Symbole	Symbole	Texte	6
Numéro atomique	Numéro atomique	Numérique	4
Période	Période	Numérique	4
Groupe	Groupe	Texte	6
Structure cristalline	Structure cristalline	Texte	30



Electronégativité (Pauling)	Electronégativité	Numérique	4
Densité à 300K (g/cm <sup>3</sup> )	Densité	Numérique	4
Degré d'oxydation	Degré d'oxydation	Numérique	8
Rayon atomique (A°)	Rayon atomique	Numérique	8
Rayon covalent (A°)	Rayon covalent	Numérique	8
Chaleur spécifique (J/kg)	Chaleur spécifique	Numérique	8
Masse volumique (g.mol <sup>-1</sup> )	Masse volumique	Numérique	8
Température de fusion (K)	Tempé_fusion	Numérique	8
Température d'ébullition (K)	Tempé_ébullition	Numérique	8
Photo du métal	Pho_métal	Objet OLE	2000

**Tagglomération :**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de l'agglomération	Cod_agglomération	NuméroAuto	4
Code de grillage	Cod_grillage	Numérique	4
Type d'agglomération	typ_agglo	Texte	20
Température de chauffe (C°)	Tempé_chauffes	Numérique	8
Volume de la brique (m <sup>3</sup> )	dimen_brique	Numérique	8
Poids de brique (Kg)	poid_brique	Numérique	8
Machine d'agglomération	Machi_agglo	Texte	100
Puissance d'agglomération(W)	Puis_agglo	Numérique	4
Type de procédé	typ_procé	Texte	30
Résistance d'agglomération	résist_agglo	Numérique	4

**Tgrillage :**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de grillage	Cod_grillage	NuméroAuto	4
Code de préparation	Cod_pré	Numérique	4
Code de concentration	Cod_concent	Numérique	4



Procédé de grillage	Proc_grillage	Texte	50
Mode de grillage	mod_grillage	Texte	50
Minéraux utilisés	miner_uti	Texte	10
Température (°C)	tempér	Numérique	8
Métal utilisé	mét_uti	Texte	12
Type de séparation	typ_sépara	Texte	50
Type d'objectif	typ_objectif	Texte	50
Type de four	typ_four	Texte	100
Capacité du four (t/j)	capa_four	Numérique	8

**Tcalcination :**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de calcination	Cod_calcination	NuméroAuto	4
Code de l'agglomération	Cod_agglomération	Numérique	4
Le minerai calciné	mine_calciné	Texte	20
La température (°C)	tempér	Numérique	8
Produit éliminé	prod_élimi	Texte	20
Type de four utilisé	typ_four	Texte	100
Capacité de four (t/j)	capa_four	Numérique	8
Granulométrie (mm)	granul	Numérique	8
Consommation énergétique (th/ton)	conso_énerg	Numérique	8
Type de combustible	typ_combu	Texte	10
Consommation combustible (th/ton)	conso_combu	Numérique	8

**Tfusion**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de fusion	Cod_fusion	NuméroAuto	4
Code de grillage	Cod_grillage	Numérique	4
Élément indésirable	elém_indes	Texte	10



Température de fusion (°C)	temp_fusion	Numérique	8
Type de four utilisé	typ_four	Texte	50

**Tlixiviation :**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de lixiviation	Cod_lixiviation	NuméroAuto	4
Code de grillage	Cod_grillage	Numérique	4
Code de fusion	Cod_fusion	Numérique	4
Type de lixiviation	Typ_lixiviation	Texte	20
Type d'agents de lixiviation (solvant)	typ_ag_lixiv	Texte	30
Agents	Agents	Texte	20
Concentration (%)	concent	Numérique	8
La température (°C)	tempéra	Numérique	60
La durée de la lixiviation (s)	dur_lixi	Numérique	8
Le PH de milieu	PH	Numérique	4
Granulométrie (%)	granulom	Numérique	4
Type d'agitation	typ_agit	Texte	50
La vitesse d'agitation (m/s)	vites_agit	Numérique	8
La durée d'agitation(s)	dur_agit	Numérique	8
Débit (m3/s)	débit	Numérique	8
Pression (N/m2)	pres	Numérique	8
La densité de la pulpe (kg/m3)	densi_plup	Numérique	4
Poids spécifique (Kg)	poid_spés	Numérique	4
Surface spécifique (m2)	surf_spés	Numérique	4
Humidité (%)	humidité	Numérique	4
La porosité (%)	porosité	Numérique	8



**Télectrolyse :**

<b>Champ</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Type</b>	<b>Taille</b>
Code de l'électrolyse	Cod_electro	NuméroAuto	4
Code de lixiviation	Cod_lixiviation	Numérique	4
Code de l'extraction	Cod_extraction	Numérique	4
Type de réaction	typ_réac	Texte	50
Type de l'électrolyte	typ_électro	Texte	10
Type de milieu	typ-milieu	Texte	20
Réaction de l'électrolyse	réact_electro	Texte	20
Production (Kg/h)	Pro_calcule	Numérique	4
Rendement de courant (%)	Ren_courant	Numérique	4
Rendement énergétique (%)	Ren_énergétique	Numérique	4
Consommation spécifique (Kwh/Kg)	Conso_spécifique	Numérique	4
Schéma de l'électrolyse	Sch_électrolyse	Objet OLE	2000

**Textraction :**

<b>Champ</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Type</b>	<b>Taille</b>
Code de l'extraction	Cod_extraction	NuméroAuto	4
Cod de calcination	Cod_calcination	Numérique	4
Code de lixiviation	Cod_lixiviation	Numérique	4
Type d'extraction	Typ_extraction	Texte	20
L'efficacité d'extraction (%)	effi_extraction	Numérique	4
Coefficient de répartition du métal à extraire (%)	Co_répartition	Numérique	4
Agents d'extraction	Ag_extraction	Texte	40
Densité de l'agent d'extraction (g/cm3)	densité	Numérique	4
Viscosité de l'agent d'extraction (%)	viscosité	Numérique	4
Type d'appareil utilisé	typ_app	Texte	40



**Téch\_ionique**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de l'échange ionique	Cod_ech_ion	NuméroAuto	4
Code de lixiviation	Cod_lixiviation	Numérique	4
Code de l'extraction	Cod_extraction	Numérique	4
Type de phase d'échange ionique	typ_pha_ech	Texte	20
La vitesse de l'échange ionique (m/s)	Vite_ech	Numérique	8
Capacité de l'échange ionique (Kg)	Capac_ech	Numérique	8
Type de groupe	typ_group	Texte	10
Type résine	typ_résine	Texte	30
Nature d'échange ionique	natu_ech	Texte	15
Type de réactif utilisé	typ_reac	Texte	40
Stade d'échange ionique	stad_ech_ion	Texte	40

**Tcémentation :**

Champ	Abréviation	Type	Taille
Code de la cémentation	Cod_cement	NuméroAuto	4
Code de l'électrolyse	Cod_electro	Numérique	4
Réaction de cémentation	rea_cement	Texte	60
Potentiel standard (volts)	Pote_stan	Numérique	8
Vitesse d'écoulement (m/s)	vite_ecole	Numérique	8
Récupération du métal (%)	recup_métal	Numérique	8

### III.2.3 Les différents champs utilisés dans les tables de paramétrage :

Pour que notre système d'informations puisse répondre à toute modification dans les procédés métallurgique utilisés, nous avons conçu des tables permettant de stocker les nouvelles informations. Ces tables apparaissent dans le tableau (2).

Table	Champ	Type
Ttyp_app_extraction	Type d'appareil de l'extraction	Texte
Tren_énerg	Rendement énergétique	Numérique
Tren_cour	Rendement de courant	Numérique
Tvit_décantation	Vitesse de décantation	Numérique
Tfour_fusion	Type de four	Texte
Ttyp_ap_pr	Type d'appareil	Texte
Tfour_ag_gr_ca	Type de Four	Texte
Tg_typ_ap_con	Genre d'appareil de concentration	Texte
Tconsom_eps	Consommation spécifique	Numérique
Tcal_prod	Production	Numérique
Ttyp_ap_con	Type d'appareil de concentration	Texte

**Tableau (2) :** les différents champs des tables de paramétrage.



### III.2.4 Les relations entre les tables :

Access est un système de gestion de base de données relationnelles, signifiant qu'il est impossible de concevoir une application « Access » sans mettre en relation les tables ; leur principal rôle consiste à associer des enregistrements de plusieurs tables, et « Access » les utilisera pour trouver des données « enregistrements » spécifiques dans la base de données créée.

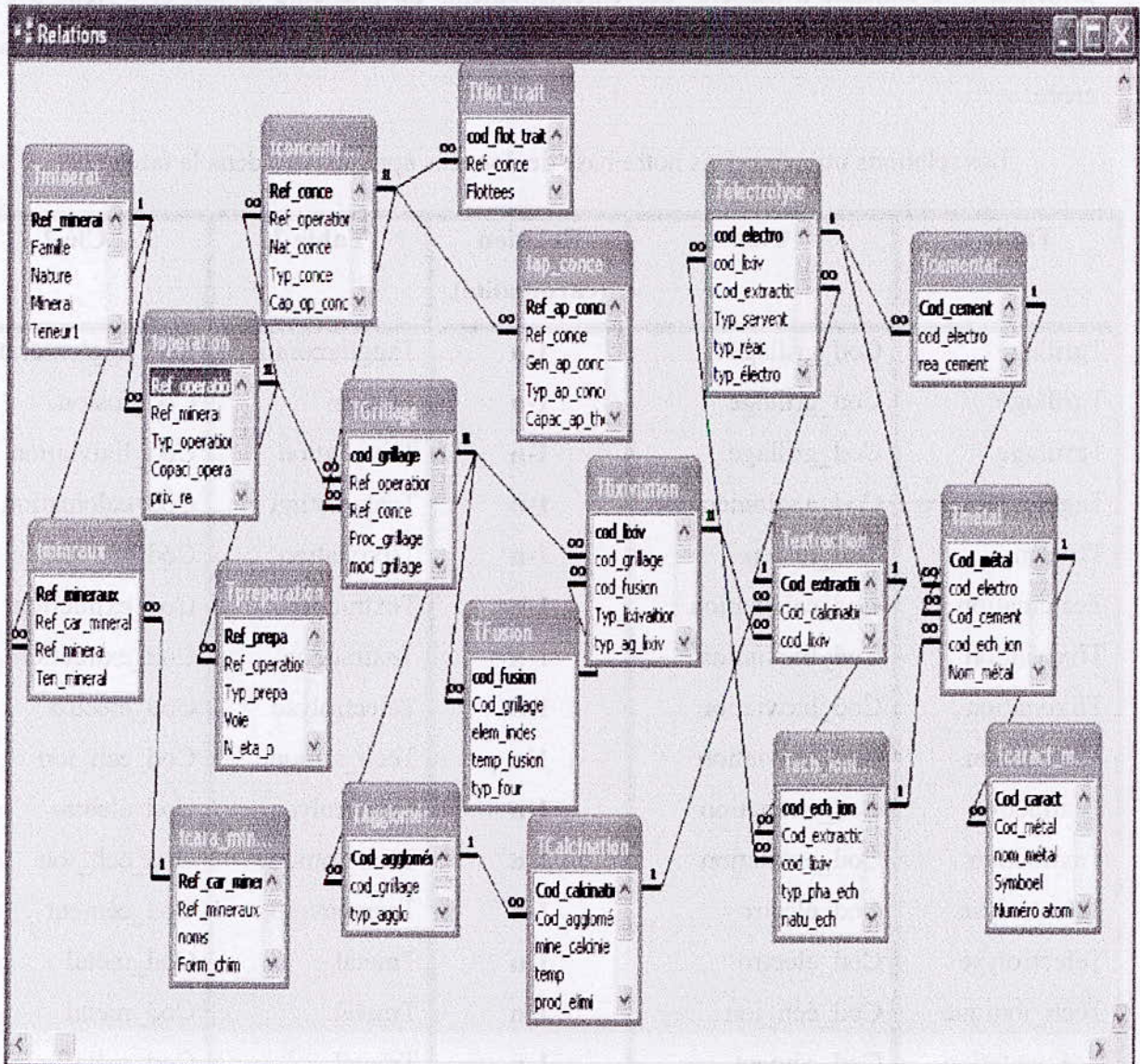
Les relations utilisées dans notre base de données apparaissent dans la table (3).

Table 1	Clé1	Relation (cardinalité)	Table 2	Clé 2
Tgrillage	Cod_grillage	1-n	Tagglomération	Cod_agglomération
Tgrillage	Cod_grillage	1-n	Tfusion	Cod_fusion
Tgrillage	Cod_grillage	1-n	Tlixiviation	Cod_lixiviation
Tagglomération	Cod_agglomération	1-n	Tcalcination	Cod_calcination
Tfusion	Cod_fusion	1-n	Tlixiviation	Cod_lixiviation
Tcalcination	Cod_calcination	1-n	Textraction	Cod_extraction
Tlixiviation	Cod_lixiviation	1-n	Textraction	Cod_extraction
Tlixiviation	Cod_lixiviation	1-n	Télectrolyse	Cod_électro
Tlixiviation	Cod_lixiviation	1-n	Téch_ionique	Cod_éch_ion
Textraction	Cod_extraction	1-n	Télectrolyse	Cod_électro
Textraction	Cod_extraction	1-n	Téch_ionique	Cod_éch_ion
Télectrolyse	Cod_électro	1-n	Tcémementation	Cod_cément
Télectrolyse	Cod_électro	1-n	Tmétal	Cod_métal
Téch_ionique	Cod_éch_ion	1-n	Tmétal	Cod_métal
Tcémementation	Cod_cément	1-n	Tmétal	Cod_métal
Tmétal	Cod_métal	1-n	Tcaract_métal	Cod_caract

**Tableau (3)** : les relations entre les tables.



III.2.5 Le schéma relationnel final de la base de données :





## IV Traitement de données :

### IV.1 Introduction :

Une base de données est, en général, créée pour être consultée. Elle peut être également mise à jour. Pour faciliter ces opérations de consultation et de mise à jour, le traitement de données est indispensable pour le bon fonctionnement de notre système d'informations. Ce traitement comporte toutes les opérations et procédures, qui peuvent faciliter l'accès aux données et rendre l'usage simple et souple.

Pour répondre à ces objectifs, notre base de données est traitée par :

- ✓ L'interface (les formulaires) ;
- ✓ Le paramétrage ;
- ✓ Le boîte de message ;
- ✓ La recherche ;
- ✓ L'optimisation de saisie

### IV.2 Les formulaires :

#### IV.2.1 Les formulaires principaux :

Afin de faciliter la saisie et la consultation, on a créé les formulaires principaux, basés sur les différentes tables principales [tableau (4)].

Les formulaires	Nom formulaire	La table
<b>Rapport final</b>	<b>Fmineraï</b>	<b>Tmineraï</b>
<b>Agglomération</b>	<b>Fagglomération</b>	<b>Tagglomération</b>
<b>Grillage</b>	<b>Fgrillage</b>	<b>Tgrillage</b>
<b>Calcination</b>	<b>Fcalcination</b>	<b>Tcalcination</b>
<b>Fusion</b>	<b>Ffusion</b>	<b>Tfusion</b>
<b>Lixiviation</b>	<b>Flixiviation</b>	<b>Tlixiviation</b>
<b>Extraction</b>	<b>Fextraction</b>	<b>Textraction</b>
<b>Electrolyse</b>	<b>Felectrolyse</b>	<b>Telectrolyse</b>
<b>Echange ionique</b>	<b>Fech_ionique</b>	<b>Tech_ionique</b>
<b>Cémentation</b>	<b>Fcémentation</b>	<b>Tcémentation</b>

**Tableau (4) :** Les principaux formulaires.

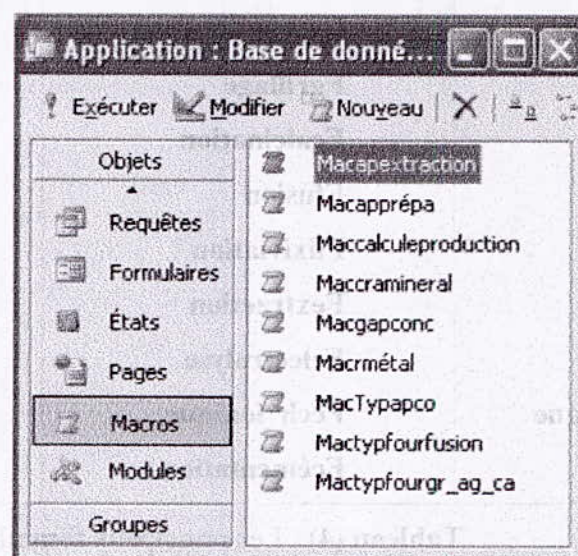
### IV.3 Les requêtes:

On a créé 9 requêtes pour la recherche et la création des formulaires :

Requête	Basé sur table
<b>Rmineraï</b>	<b>Tmineraï</b>
<b>Rmétal</b>	<b>Tmétal</b>
<b>Rlist_four_agc</b>	<b>Tfour_ag_gr_ca</b>
<b>Rlist_ap_four_fision</b>	<b>Tfour_fusion</b>
<b>Rfusion</b>	<b>Tfour_fusion</b>
<b>RFourgac</b>	<b>Tfour_ag_gr_ca</b>
<b>Rconsom_spéc</b>	<b>Tconsom_eps, Tren_énerg, Tren_cour</b>
<b>Rap_conce</b>	<b>Tg_typ_ap_con</b>
<b>Rg_ap_conce</b>	<b>Tg_typ_ap_con</b>

### IV.4 Création de macros :

Les macros ont été créées, afin de répondre aux besoins du logiciel ; la majorité de ces macros sont des programmes d'ouverture de formulaires de paramétrage ou d'état.



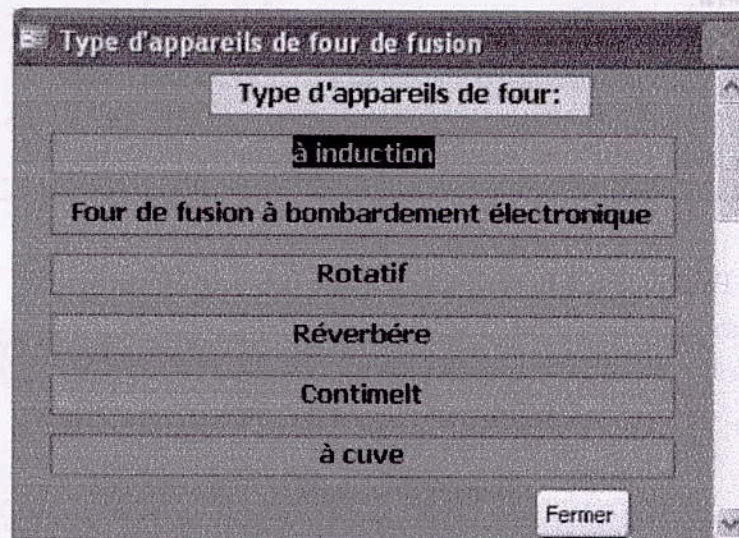


#### IV.5 Le paramétrage :

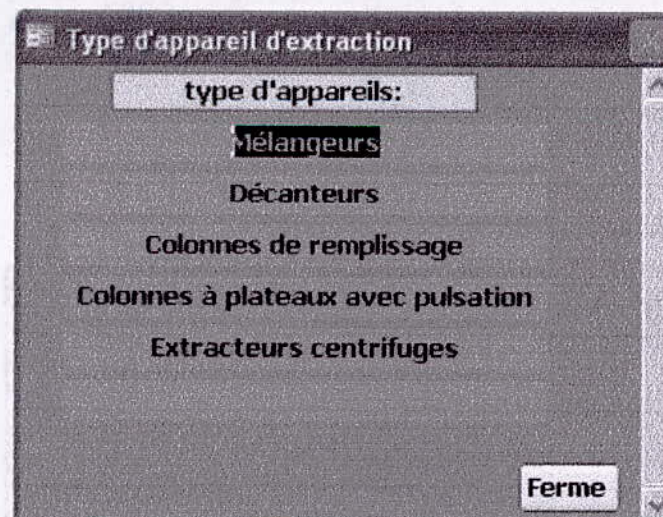
Grâce au paramétrage, toutes les listes de choix conçues dans l'application vont être basées sur des tables, où l'ajout sera autorisé ; toute évolution trouvera alors sa place dans les listes de paramétrage. Pour notre application, les formulaires paramétrages sont mis à la disposition de l'utilisateur.

##### IV.5.1. Les formulaires de paramétrage :

- ❖ Pour ajouter type de four de fusion.



- ❖ Pour ajouter type d'appareil d'extraction.





❖ Pour adjoindre un minéral

❖ Pour calculer la production d'une cellule d'électrolyse.

❖ Pour calculer le rendement de courant.



- ❖ Pour calculer le rendement énergétique.

**Rendement énergétique**

**Rendement énergétique(%):**

Différence de tension:

Différence de potentiel:

Intensité de courant:

Rendement de courant:

Energie réelle:

Energie théorique:

Calcul

- ❖ Pour calculer consommation spécifique

**Consommation spécifique**

**Consommation spécifique(Kwh/Kg):**

Energie réelle(Kwh):

Production réelle(kg):

Calcul

- ❖ Pour calculer la vitesse de décantation.

**Calcul la vitesse de décantation**

**La vitesse de décantation(mm/s):**

L'accélération de la particule (mm/s<sup>2</sup>):

La masse volumique de la particule(g/mm<sup>3</sup>):

La masse volumique du liquide(g/mm<sup>3</sup>):

Diamètre apparent de la particule(mm):

Viscosité dynamique de l'eau(s/mm<sup>2</sup>.g):

Calcul

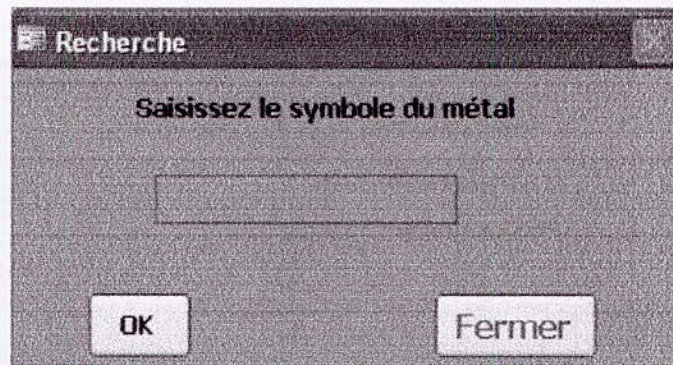


#### IV.6 La recherche :

Elle permet de trouver des informations spécifiques très rapidement ; à cet effet, on a réalisé plusieurs formulaires, pour :

- Retrouver automatiquement les Caractéristiques d'un métal ;
- Retrouver automatiquement les appareils de four utilisés dans l'opération de fusion ;
- Retrouver automatiquement les appareils de four utilisés dans les opérations d'agglomération, de grillage et de calcination ;
- Retrouver automatiquement les appareils utilisés dans l'extraction.

A titre d'exemple, la recherche des caractéristiques d'un métal.

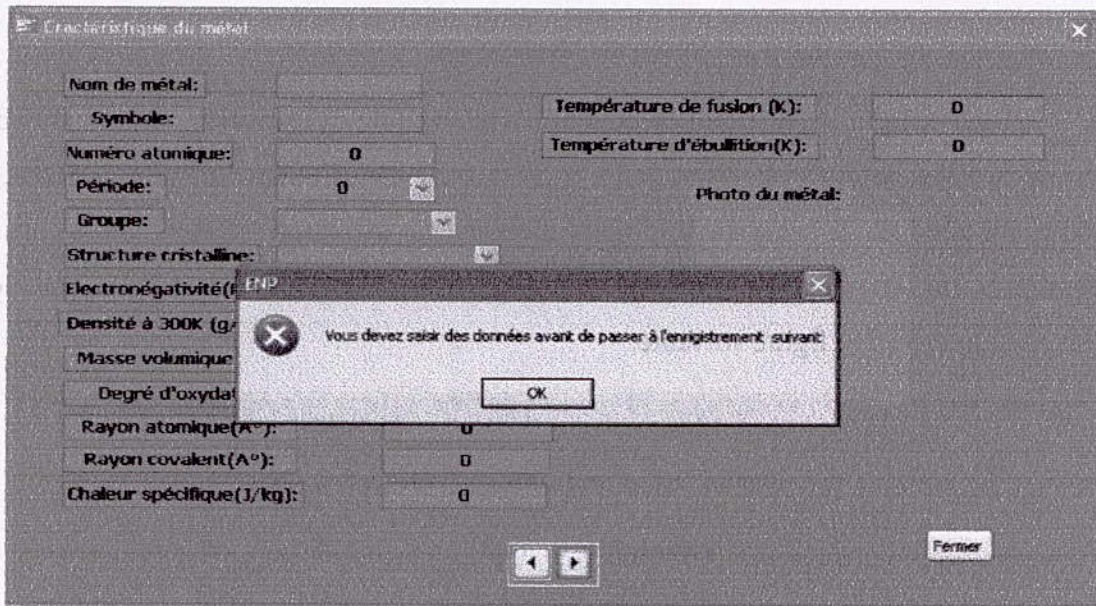


#### IV.7 les boîtes de message :

Elles permettent d'informer, d'annoncer une erreur et d'aider l'utilisateur. Elles apparaissent suite à certaines actions.

Si on clique sur le bouton « enregistrement suivant », sans avoir au préalable précisé les données propres aux caractéristiques du métal comme résultat, une boîte de message apparaît signalant l'obligation de saisir ces dites données pour que l'enregistrement puisse être mené à bien.

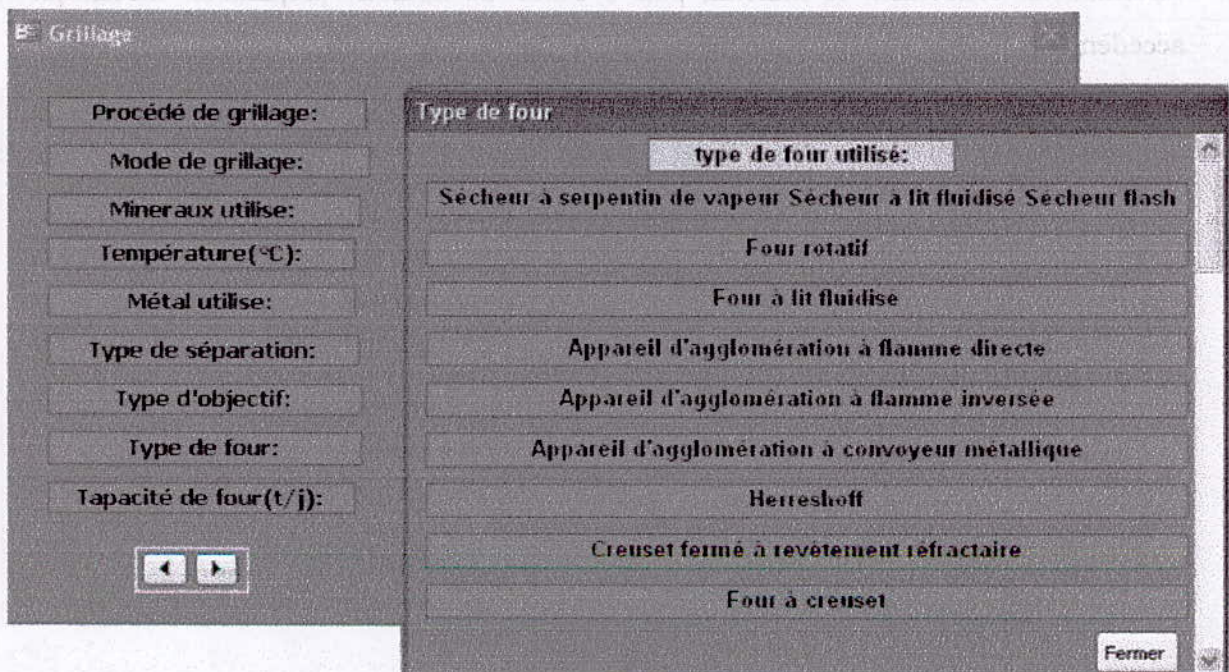




#### IV.8 L'optimisation de saisie :

Elle permet de réduire les erreurs de frappe de l'utilisateur et même d'optimiser le temps de saisie. L'optimisation de saisie est traduite par la création des listes déroulantes et des formulaires. En effet, plusieurs champs sont dotés d'une liste déroulante ou d'un formulaire instantané apparaissant simplement en cliquant sur le champ sélectionné.

Par exemple, si nous cliquons sur le champ « Type de four », le formulaire «Ftype de four d'agglomération, de grillage et de calcination » s'ouvre automatiquement, celui-ci contenant une liste de choix ; si nous cliquons deux fois sur un type de four, la valeur sera directement introduite dans le champ « Type de four » référer figure suivante.





De même pour calculer les fonctions numériques.

Par exemple, on calcule la production d'une cellule d'électrolyse, si nous cliquons sur le champ « Production », le formulaire « Félectrolyse » s'ouvre automatiquement, celui-ci contenant une liste de paramètres, si nous cliquons sur le bouton « Calcul » et si nous cliquons deux fois sur le résultat de calcul, la valeur sera directement introduite dans le champ « Production » réfère figure suivante.

Production d'une cellule d'électrolyse (Kg/h):

Indensité de courant :	45
Constante de Faraday:	26,8
Masse atomique du métal:	65,38
Valeur de la valence:	2

calcul

54,88992

### V. Description de l'application :

L'application est composée de plusieurs fenêtres, décrivant les procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques et l'appareillage à utiliser.

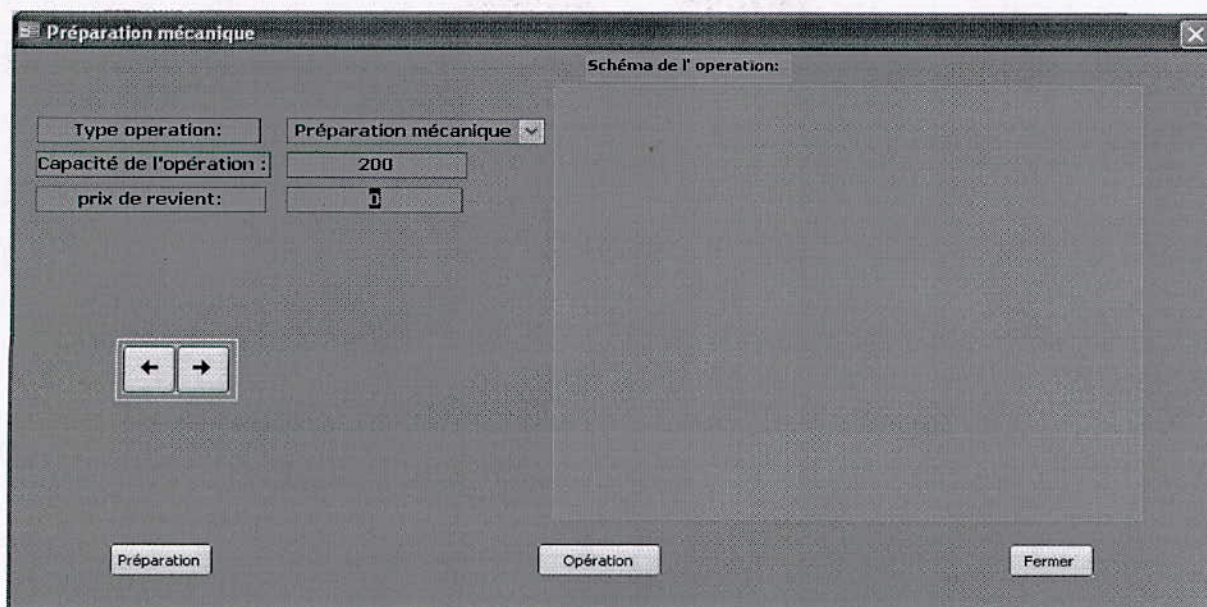
Elle s'ouvre par la fenêtre « minerai », dans laquelle l'utilisateur saisira les informations concernant le minerai, puis à l'aide du bouton « préparation mécanique », il accèdera à la fenêtre « préparation mécanique » [figure ci-dessous].

Mineral

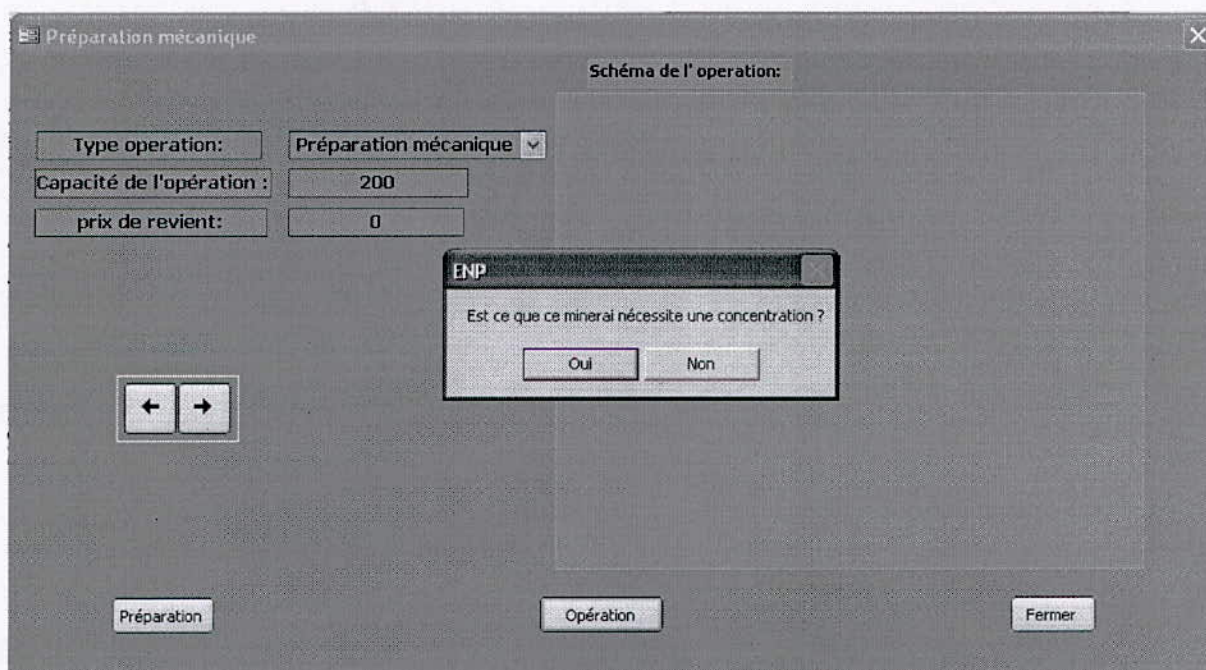
Famille:	Mineral métallique non ferreux	Eléments nuisible:	Argile
Nature:	Matière première non-métallique minière		
Mineral:	ZnS		
Teneur %:	64,94	Existance de sous produit:	Oui <input checked="" type="checkbox"/>
Origine:		Nombre de sous produits:	II <input checked="" type="checkbox"/>
Porosite%:	3	Premier sous produit:	
Densité du mineral:	4,15	Teneur %:	0
Densité de la gangue:	2,86	Deudème sous produit :	
Dimension de libération mm:	30	Teneur %:	0

Mineral      Préparation mécanique      Fermer





Le bouton « Opération » permettra de choisir le type d'opération pyrométallurgique (grillage, agglomération, calcination, fusion) ou le type d'opération hydrométallurgique (lixiviation, électrolyse, extraction, cémentation, échange ionique..) ; si nous cliquons sur cette bouton il y'a une boite de choix (Oui, Non), figure ci-dessous.



Si nous cliquons sur « Non »,on passer directement à l'opération de grillage, dans La fenêtre « grillage » là outre bouton « Opération » pour choisir Type d'operation suivante , il sera le même pour chaque opération jusque obtenir un métal à l'état pur.

# Conclusion générale



## Conclusion générale :

L'objectif recherché dans cette étude consiste à concevoir une application, impliquant des procédés et des techniques afférents à l'élaboration des métaux à partir de minerais ou de concentrés.

Les principaux paramètres technologiques des procédés et techniques, dans le domaine de la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie, ont été pris en considération au niveau de cette étude.

Parmi tous les systèmes en cours, celui d'Access a pu, dans le cadre de cette étude, répondre favorablement à la réalisation de notre application dans le domaine de la métallurgie extractive des minerais et des concentrés.

Cette étude sera utilisée pour accéder facilement et rapidement à l'information sur les procédés métallurgiques, afin d'obtenir le métal à l'état pur, et répondant en partie aux objectifs fixés par l'axe de recherche pris en charge par le département Génie minier.

Parmi tous les SGBDR, l'Access a pu dans le cadre de notre étude répondre à la réalisation de notre programme informatique, vu la quantité d'informations qu'il peut contenir et aussi grâce aux services qu'il peut offrir pour manipuler les données, tout en attirant l'attention sur sa simplicité dans la création des bases de données.

Par le biais de l'outil informatique, nous pouvons optimiser ces tâches de gestion au vu des avantages suivants :

- Gains de temps appréciables dans l'exécution de tâches.
- Sécurité des informations.
- Gestion des informations.
- Modification des documents et création d'autres, pour s'adapter au nouveau système.
- Acquisition d'un système informatique complet.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- **AITOUARET.R., (2004)** : « Conception d'une application sur les méthode traitement des gisements algériens ». PFE : Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie Minier.
- [2]- **AOAKA., (1984)** : « Les systèmes de gestion de bases de données », Editions Eyrolles.
- [3]- **BEGAR ABDELHAKIM., (2001)** : « Conception d'un système d'information pour le suivi de l'activité forage et sondage », Thèse de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie Minier.
- [4]-**C.CHAUSSIN, G.HILLY., (1980)** : « Elaboration des métaux », Métallurgie tome 2. Orléans, France.
- [5]-**CHRISMENT C, LUGUET J, PUJOLLE G, ZURFLUH G., (1991)** : « Bases de données relationnelles », Technique de l'ingénieur, Traité informatique.
- [6]- **GALACSI, (1989)** : « Conception de bases de données », Editions Dunod.
- [7]-**GARDARIN, G., (1984)** : « Bases de données–Les systèmes et leurs langages », Collection : Architecture des systèmes d'informations.
- [8]- **J.PHILIBERT, A.VIGNES, P.COMBRADE., (1997)** : « Métallurgie du minerai au matériau ».Boulevard Saint-Germain.
- [9]- **M.BALID., (2000)** : « Programmer les bases de données avec Access ».
- [10]- **MEMOIRE PRESENTE A LA FACULTE DES ETUDES SUPERIEURES DE L'UNIVERSITE LAVAL POUR L'OBTENTION DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES.,(2000)** : «Amélioration du rendement des particules grossières par la stratégie d'addition des réactifs dans un banc de flottation ». Département de Mines et Métallurgie, Canada.
- [11]-**TECHNIQUE DE L'INGENIEUR** : « Pyrométallurgie », Métallurgie extractive. Volume : BN2, N° : M 2 231.
- [12]-**TECHNIQUE DE L'INGENIEUR** : « Hydrométallurgie », Métallurgie extractive. Volume : BN2, N° : M 2 235.
- [13]-**SAADA.A., (2005)** : « Cours de métallurgie extractive des métaux non-ferreux ». : Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie Minier.



**[14]- INTERNET :**

- a-** <http://www.lenntech.com/français/coagulant-floculant.htm>
- b-** <http://www.lenntech.com/français/Flottation-mecanique.htm>
- c-** [http://www.ifremer.fr/drogm\\_uk/Realisation/Miner/Nod/texte/txt16.html](http://www.ifremer.fr/drogm_uk/Realisation/Miner/Nod/texte/txt16.html)
- d-** [http://www-ipst.u-strasbg.fr/pat/internet/didactic/access-vecu/mp\\_em.htm](http://www-ipst.u-strasbg.fr/pat/internet/didactic/access-vecu/mp_em.htm)
- e-** [http://perso.wanadoo.fr/etps/ether\\_couronne/framedev5.html](http://perso.wanadoo.fr/etps/ether_couronne/framedev5.html)
- f-** <http://www.lenntech.com/français/les-etapes-agglomerations.htm>
- g-** <http://www.tec-ingenierie.fr/Sitetec/metal.htm>
- h-** [http://www.snclavalin.com/fr/2\\_0/2\\_14\\_2.aspx](http://www.snclavalin.com/fr/2_0/2_14_2.aspx)
- i-** <http://www.ac-rouen.fr/lycees/galilee/metallurgietermes.html#traitements>
- j-** <http://www.ac-rouen.fr/lycees/galilee/metallurgietermes.html#lixiviation>
- k -** <http://www.sfc.fr/index.html>
- l-** <http://www.ac-rouen.fr/lycees/galilee/metallurgietermes.html#extraction>
- m-** <http://aida.ineris.fr/bref/metaux.htm>
- n-** [http://www.cuivre.org/le\\_cuivre/proprietes\\_alliages/index.htm](http://www.cuivre.org/le_cuivre/proprietes_alliages/index.htm)
- o-** [http://www.airproducts.fr/metals/nonferrous\\_meltingCasting.htm](http://www.airproducts.fr/metals/nonferrous_meltingCasting.htm)