



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par :

Mr DRAHMANI Billal

Mr HAMIDOUCHE Idir

Thème

***Etude de la récupération du zinc des
résidus de lixiviation***

Soutenu le 30 /06 /2024, devant le jury composé de :

Président	Mr MEGHERFI Karim	M.C.B	U.A.M.B
Promotrice	Mme SOUCI Zahia	M.C.A	U.A.M.B
Examinatrice	Mme KICHER Kahina	M.A.A	U.A.M.B
Co promotrice	Mme SI TAYEB Houda	Doctorante	U.A.M.B

Année Universitaire : 2023-2024

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout d'abord «**ALLAH**» le tout puissant.

Arrivés au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier, énormément, tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

Nous tenons tout d'abord à remercier Mme Z. SOUICI, pour son encadrement bénéfique et ses conseils judicieux qui nous ont été d'une grande utilité, qu'elle trouve ici, l'expression de nos profondes reconnaissances.

Nous remercions Mr K. MEGHERFI d'avoir accepté la tâche de présider notre jury de soutenance.

Un remerciement particulier à Mme K. KICHER d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont également à Mr KARNIF Youssef, chef de service d'exploitation de l'unité KHERZET YUCEF pour son aide précieuse et sa disponibilité, sans oublier tous les ingénieurs de l'unité, pour leurs disponibilités et leurs serviabilités. Mr KARIM et Mme. Meriem.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos vifs remerciements à mademoiselle SI TAYEB NOR ELHOUDA doctorante au département des Mines et Géologie pour ses qualités humaines et pour son support scientifique, moral et matériel pendant toute la durée du travail sans oublier l'aide inestimable de Monsieur A.H SOUICI pour son aide et sa disponibilité.

Nos sincères remerciements à tous les enseignants du département Mines et géologie pour leurs gentillesse, leurs générosités, ainsi que leurs disponibilités, en dépit de leurs nombreuses occupations.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACE

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail avec toute mon affection aux êtres, qui me sont très chers au monde mes parents j'aimerais qu'il soit le témoignage de leurs consécration et leur foi en moi.

*La plus merveilleuse mère "Nadia", que **ALLAH** le tout-puissant la protège.*

Au plus adorable et gentil père au monde "Nordine" qui m'a tout donné sans rien recevoir en parallèle, que je remercie infiniment de ces services.

A mes chers frères, et sœur.

A mes grands-parents, et toute ma grande famille DRAHMANI chacun par son nom. Ainsi toute La Famille Dahmani ..

A mes amis surtout : Oussama, Issam, l'association NBQuran Bejaia, l'équipe elzikhwa « chikh Badis, Ahmed, Akram, Juba, Kouceilla, Rayane, Abdraouf, Fares.. L'équipe Karha "Ouali, yassine, Sofiane, Farid, Zino ..

A tout le personnel de département Génie minier et toute la promotion 2019-2024.

A tous ceux qui par leur sourire, leurs gentillesse et espoir, m'ont Encouragé à poursuivre mes études.

Mon binôme bien sur "Idir" qui ma compagnie pendant tout la durée de ce travail.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail avec toute mon affection aux êtres, qui me sont très chers au monde mes parents j'aimerais qu'il soit le témoignage de leurs consécration et leurs foi en moi. A mon cher frère, et sœurs.

*A la mémoire de mes grands parents, et toute la famille
HAMIDOUCHE chacun par son nom ..*

A mes amis proches et loin ...

*A tout le personnel de département Génie minier et toute la
promotion 2019-2024.*

*A tous ceux qui par leurs sourire, leurs gentillesse et espoir,
m'ont Encouragé à poursuivre mes études.*

*Mon binôme bien sur "Billal" qui ma compagnie pendant tout la durée
de ce travail.*



LISTE DES ABRIVIATIONS

Cd: Cadium.

Sb: Antimonie.

Ag: Argent.

Zn: Zinc.

ZL: Zinc Lamine.

Ca: Calcium.

Fe: Fer.

Mg: Magnesium.

Ba: Barium.

Al: Aluminium.

Ni: Niobium.

P: Potassium.

Mn: Manganèse.

Sr: Strontium.

S: Sulfur.

ZnO: Oxyde de Zinc.

ZnS: Sulfur de Zinc.

H₂SO₄: Acide Sulfurique.

RC: Retour Cellule.

ZnSO₄: sulfate de zinc.

H₂S: sulfure d'hydrogène.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Diagramme d'équilibre potentiel-pH à 25 °C du système zinc-eau (d'après M. Pourbaix).....	4
Figure I-2 : Sphalerite-Blende.	6
Figure I-3 : Smithsonite.....	6
Figure I-4 : Minerai Hémimorphite.....	7
Figure I-5 : Minerai de Willemite.....	8
Figure I-6 : Minerai de Franklinite.....	8
Figure I-7 : Zincite.....	9
Figure I-8 : Minerai de Hydrozincite.....	10
Figure I-9 : Situation géographique du gisement Chaâbat-El-Hamra [Source : Google Earth].	12
Figure I-10 : Carte géographique des principaux gites et gisements en Algérie. [12]	15
Figure I-11 : Opérations technologiques d'extraction du zinc par Pyrométallurgie. [14].....	16
Figure I-12 : Grillage en lit fluidisé.....	16
Figure I-13 : Grillage à multiple foyer.	17
Figure I-14 : Réduction carbothermique du zinc.....	18
Figure I-15 : Électrolyse du zinc.	19
Figure I-16 : Procédé d'extraction du zinc par hydrométallurgie. [13]	21
Figure I-17 : Schéma simplifié le principe de lixiviation.....	23
Figure I-18 : purification de zinc.....	24
Figure I-19 : Processus d'électro déposition.....	26
Figure II-1 : schéma d'échantillonnage systématique.....	29
Figure II-2 : Organigramme de préparation du minerai pour essais et analyses.....	30
Figure II-3 : Photo du concasseur à mâchoire (laboratoire du département).....	31
Figure II-4 : Photo de l'homogénéisation du minerai concassé.....	32
Figure II-5 : Opération de quartage.....	33
Figure II-6 : Broyeur à disque.....	34
Figure II-7 : Opération de tamisage.....	36
Figure II-8 : Photo de l'analyseur à fluorescence X.....	37
Figure II-9 : Principe des spectromètres portables par fluorescence X. [18].....	38
Figure II-10 : schéma simplifier le principe de l'UV-Visible.....	39
Figure II-11: Préparation des trois concentrations.....	41
Figure II-12: Solutions préparées.....	41
Figure II-13: L'opération d'agitation.....	42
Figure II-14 : Filtration des solutions agitées.....	43
Figure II-15 : Le suivi par ultraviolet (UV).....	44
Figure II-16: Etuve de laboratoire.....	45
Figure II-17: Rejet séchée.....	46
Figure II-18 : Préparation de la solution de rejet.....	46
Figure III-1 : Courbe de répartition granulométrique du minerai.....	59
Figure III-2 : Histogramme de composition chimique des fractions granulométrique de minerai de zinc.....	62
Figure III-3 : Spectre UV visible des 03 solutions.....	63
Figure III-4 : Histogramme de répartition des teneurs d'éléments dans le rejet.....	65

LISTE DES FIGURES

Figure III-5: Spectre UV visible du rejet issu d'une double lixiviation.....67

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Résultats de l'analyse granulométrique du minerai de zinc brut.....	58
Tableau III-2 : Teneurs d'éléments dans le minerai brut.....	60
Tableau III-3 : La composition chimique du minerai (Analyse par FX).	61
Tableau III-4 : Composition chimique du rejet issu de la première lixiviation.	64
Tableau III-5 : Teneurs d'éléments dans la deuxième lixiviation.	66

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT..... i
DEDICACE ii
LISTE DES ABRIVIATION..... iv
LISTE DES FIGURES v
LISTE DES TABLEAUX vii
INTRODUCTION GENERALE.....

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LE ZINC

Introduction.....2
I.1 le zinc et ses minerais.....2
I.1.1 Propriétés physiques2
I.1.2 Propriétés chimiques.....3
I.2 minerais de zinc.....6
I.3 gisements du zinc en algérie..... 11
I.3.1 Gisement de Chaâbat-El-Hamra – Sétif 11
I.3.2 Autres gisements..... 14
I.4 Étude des méthodes d'extraction du zinc utilisés dans l'industrie 15
I.4.1 Pyrométallurgie 15
I.5 Hydrométallurgie20
I.5.1 Grillage21
I.5.2 Lixiviation22
I.5.3 Purification24
I.5.4 Électrodéposition.....25
Conclusion.....27

CHAPITRE II: EXTRACTION DU ZINC METHODES ET MATERIELS

Introduction.....28
II.1 Conditionnement du minerai.....28
II.1.1 Échantillonnage.....28
II.2 preparation mecanique29
e. Analyse granulométrique35
II.3 Méthodes d'analyses physico-chimiques36
II.3.1 Spectroscopie de fluorescence (FX)37
II.3.2 Spectroscopie UV-visible38

SOMMAIRE

II.4	Techniques expérimentales	39
II.4.1	Lixiviation du minerai de zinc	39
c.2	Préparation des solutions	40
c.3	Agitation	42
c.4	Filtration.....	42
c.5	Récupération du rejet	45
c.6	Séchage de rejet	45
c.7	Deuxième lixiviation	46
	Conclusion.....	47
CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS		
	Introduction.....	58
III.1	Résultats de l'analyse granulométrique.....	58
III.2	La composition chimique du minerai obtenue par FX	59
III.3	Résultats de la lixiviation acide.....	63
III.4	Composition chimique du résidu issu de la première lixiviation	64
III.5	Composition chimique du résidu issu de la deuxième lixiviation.....	66
	Conclusion.....	67
CONCLUSION GENERALE		68

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie minière et métallurgique est un secteur essentiel pour l'économie mondiale, mais elle génère également des quantités importantes de déchets, dont les résidus de lixiviation. Ces résidus issus des processus d'extraction de métaux, contiennent des concentrations élevées de métaux lourds et d'autres contaminants qui peuvent avoir des impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine.

On trouve souvent dans les résidus de lixiviation des quantités importantes de zinc, qui est un élément relativement abondant dans la croûte terrestre (environ 0,008 %). Il se trouve principalement sous forme de minéraux sulfurés, tels que la sphérite (ZnS) et la wurtzite (ZnS), ainsi que dans des carbonates, des silicates et des oxydes [1]. Il appartient à la catégorie des métaux lourds. Il s'agit d'un matériau de jauge qui n'est pas nécessairement de nature métallique mais qui présente une masse volumique supérieure à 6 g/cm³. Ces substances sont souvent liées à des toxicités et de grandes quantités de déchets produites par l'industrie ont fait prendre conscience des dangers du zinc en tant qu'additif métallique pour l'homme et l'environnement [2,3].

Le travail présenté dans ce manuscrit vise à étudier expérimentalement l'extraction du zinc à partir d'un résidu de lixiviation en but d'améliorer le taux d'extraction. La grande quantité de zinc retrouvée dans le résidu de lixiviation a été toujours un problème majeur pour l'industrie. Le résidu étudié provient d'un minerai échantillonné sur le site minier de Chaâbat El Hamra. Ce dernier se trouve à la wilaya de Sétif, dans la région d'Ain-Azel et à 12 km au Sud-Est du complexe minier de Kherzet-Youcef.

Le but essentiel de ce travail est l'étude de la récupération du zinc des résidus solides générés par le processus de lixiviation (processus hydrométallurgique), tout en comptant sur une méthode efficace pour extraire le zinc des rejets liquides ou solides générés après la lixiviation. Le taux élevé du zinc dans les résidus est généralement attribué à la présence du fer dans le concentré du zinc. Nous avons procédé à l'extraction par acide sulfurique en optimisant plusieurs paramètres tels que le pH, la concentration, le temps de réaction et la température. Cette méthode doit nous permettre la récupération maximale du zinc tout en minimisant la production des déchets secondaires et en respectant les réglementations environnementales en vigueur. Pour ce faire, trois chapitres sont proposés :

INTRODUCTION GENERALE

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré pour l'essentiel à une étude bibliographique et des généralités sur le zinc.

Le deuxième chapitre décrit l'ensemble de la partie expérimentale du traitement de minerai de zinc.

Le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus durant notre expérience.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

Introduction

Le zinc est le troisième métal non ferreux le plus consommé à l'échelle mondiale. En raison de ses multiples caractéristiques chimique, mécanique et biologique, il est largement utilisé dans divers domaines industriels, notamment dans la protection contre la corrosion du fer (galvanisation et protection cathodique), les industries chimiques et informatiques.

Dans ce chapitre, nous abordons principalement le zinc métallique en présentant ses caractéristiques et ses minerais. A la fin du chapitre, nous donnerons un aperçu sur les méthodes classiques de son extraction.

I.1 Le zinc et ses minerais

I.1.1 Propriétés physiques

Le zinc est un solide blanc, cassant à froid, malléable et ductile entre 100 °C et 150 °C. C'est un métal réducteur amphotère. Assez électropositif, il est facilement attaqué par les acides, avec production d'hydrogène pour les acides non oxydants [4].

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Le numéro atomique $Z=30$
- La configuration électronique de l'état fondamental est la suivante : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}$.
- Le zinc est classé dans le groupe II B de la catégorie périodique.
- La masse moyenne des atomes est de 65,38 g/mol.
- Sa densité est relativement élevée : 7,133 (masse volumique 7133 kg/m³).
- Le zinc présente de très basses températures de fusion et d'ébullition, avec un point de fusion de 419,5°C (692,7 K) et un point d'ébullition de 907°C (1180K).
- La cristallisation du zinc métallique se produit dans un système hexagonal compact.
- Le zinc possède entre 60 et 73 isotopes, mais il possède cinq isotopes stables : ^{64}Zn (48,9%), ^{66}Zn (27,8%), ^{67}Zn (4.1%), ^{68}Zn (18.6%), ^{70}Zn (0.5%).

➤ *Voici d'autres caractéristiques du zinc :*

- Il possède un rayon atomique de 1,35Å.
- Il possède un rayon ionique de 0,83Å.
- Il possède une conductivité thermique de 113 w/mK.
- Température de fusion de 419 °C.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- La température d'ébullition est de 907 °C.
- La capacité thermique massique varie de 20 à 100 °C 389 J • kg-1 • K-1.
- La température de fusion 108,8 kJ • kg-1.
- Energie de vaporisation 1799,8 kJ • kg-1.
- Viscosité $3,17 \times 10^{-3}$ Pa.s à une température de 450 °C.
- Pression sur la surface 7,8 mN • cm-1.
- Potentiel normal électrochimique – 0,763 V/ENH à une température de 25 °C. [5]

I.1.2 Propriétés chimiques

Le zinc possède deux propriétés : amphotère et réducteur. Il s'évapore dans les acides, entraînant la production d'hydrogène, et dans les bases solides.

Il est inaltérable dans l'air sec et ne se décompose pas. En présence d'humidité, il est recouvert d'une fine couche d'hydrocarbonate de zinc, qui ne se dissout pas. Cette description du zinc explique l'utilisation réelle du zinc dans le domaine du bâtiment. Le zinc ne réagit pas à la plupart des composés organiques.

Le zinc est une composante des cations métalliques de classe B. Le nombre d'électrons dans les niveaux extérieurs est responsable de cette classification : les cations de type B ont 10 ou 12 électrons dans les niveaux extérieurs. La structure électronique 3d¹⁰4s² du zinc favorise le partage facile d'un doublet d'électrons. Il n'est présent que dans le degré d'oxydation (+II), et dans la forme métallique. En règle générale, les orbitales 3D présentent une symétrie et les polyèdres de coordination sont plutôt réguliers. Les coordonnées du zinc sont généralement tétraédriques ou octaédriques, et plus rarement sont coordonnées [5].

Les cations métalliques de type B présentent une affinité pour le chalcophile, ce qui leur permet de créer des sulfures insolubles et des complexes solubles avec S²⁻ et HS⁻. Ils créent des liaisons avec une forte affinité covalente et forment aisément des complexes à grande stabilité.

Le schéma potentiel-pH (figure I.1) démontre que le zinc n'est pas stable en présence de l'eau à une température de 25 °C. Il est néanmoins important de souligner que la vitesse de corrosion d'un zinc très pur est lente en raison de la surtension élevée de l'hydrogène sur ce métal. Le domaine de passivation est limité entre pH 8,5 et 10,5, où le zinc est recouvert d'un film d'hydroxyde.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

Ces réflexions peuvent être surprenantes lorsque l'on sait que le zinc est résistant à la corrosion atmosphérique. Dans cette situation, le gaz carbonique crée une couche imperméable d'hydroxycarbonate qui assure la protection du métal. D'autre part, dans un environnement humide confiné, il y a bien une couche d'hydroxyde : c'est la « rouille blanche ».

Pour garantir une protection cathodique de l'acier, il est nécessaire, si l'on se trouve dans la plage de pH de formation de l'hydroxyde, de faire en sorte que la couche formée ne soit pas du tout protectrice afin d'éviter toute passivation.

Ce but est réalisé par un contrôle rigoureux de certaines impuretés dans le métal, notamment le fer, et par l'introduction de certains éléments. Dans les générateurs électrochimiques, ce potentiel électrochimique normal relativement bas du zinc est également utilisé, soit dans la zone acide (pH 4,5 : pile Leclanché), soit dans la zone très alcaline. [5]

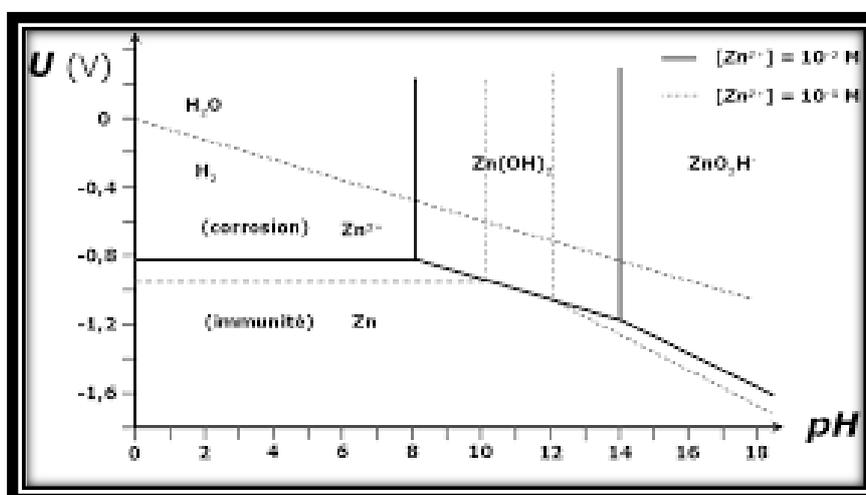


Figure I-1: Diagramme d'équilibre potentiel-pH à 25 °C du système zinc-eau (d'après M. Pourbaix).

I.1.2.1 La lutte contre la corrosion

Le zinc est un métal avec un potentiel standard de réduction de -0,76 V. En dépit de cette faible valeur, le zinc présente une résistance importante à la corrosion ; une fois qu'il est exposé aux acides et aux bases fortes, il ne l'est pas dans les solutions à pH modéré.

En présence d'air sec, le zinc ne s'oxyde presque pas (à l'exception de températures élevées, $T > 500\text{K}$). En présence d'air humide, le zinc a des qualités de matériau protecteur exceptionnelles grâce à sa capacité à s'oxyder facilement, ainsi qu'à une passivation

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

moyennement stable qui le fait osciller entre métal sacrifié et autoprotecteur en fonction de l'environnement.

Selon la valeur de E° , le zinc est oxydable car le couple Zn^{2+}/Zn se trouve en dessous du domaine de stabilité de l'eau. Cela entraîne une réduction des ions H_3O^+ avec dégagement d'hydrogène, et l'oxygène se transforme en ion OH^- . Ces deux réactions, heureusement effectuées à une tension élevée, entraînent une augmentation des ions OH^- , ce qui entraîne une augmentation du pH. [5]

Le zinc présente également une propriété passive, car grâce à la recombinaison de Zn_2 et OH^- , on produit la forme hydratée $Zn(OH)_2$, qui est très insoluble et empêche les actions de l'eau et de l'oxygène, en particulier lorsque l'état de surface du métal est peu divisé.[5]

Étant donné la présence de dioxyde de carbone dans l'air (à une pression de 3.10^{-4} bar), si la ventilation est adéquate, il est possible que la forme carbonatée $ZnCO_3$, qui est très insoluble, se forme. Malheureusement, elle est continuellement atteinte par les eaux contenant du dioxyde de carbone et des composés sulfurés. Les toitures en zinc ont une durée de vie moins longue dans les grandes villes qu'à la campagne.

La corrosion arrêtée par la couche d'hydroxyde carbonate de zinc se poursuit vers l'intérieur à une vitesse très lente, allant de $1\mu m$ par an en milieu rural à $10\mu m$ par an en milieu pollué.

Les films épais d'oxyde de zinc offrent une sensation de pulvérité et sont beaucoup moins sécurisants que les espèces carbonatées. En tant que revêtement de protection, le zinc se dégrade progressivement en raison de son processus d'auto-passivation. En revanche, lorsque le métal à protéger est exposé à l'extérieur, la couche de passivation est suffisamment fragile pour permettre le sacrifice local du zinc. [5]

I.1.2.2 La toxicité du zinc

Le zinc appartient à la famille des oligo-éléments, c'est-à-dire qu'il est essentiel pour l'activité biologique, végétale et animale, car il participe à la formation des enzymes indispensables au métabolisme. Toutefois, une fois qu'il est accumulé dans les organes cibles, comme le foie ou les reins, il devient toxique et son accumulation peut causer de graves troubles. [6]

Une carence en zinc chez l'homme peut provoquer un retard de croissance, des dommages à la peau et une diminution du système immunitaire [6]. Les niveaux essentiels de

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

zinc chez les végétaux sont proches de 200 mg/kg de matière sèche, et une surabondance de métal entraîne la chlorose des feuilles et une diminution de la production de biomasse [7]. Le zinc est particulièrement toxique pour les végétaux dans les sols acides qui n'ont pas été fortement lessés. [7]

I.2 Minerais de zinc

Le zinc est un élément métallique important avec une variété d'utilisations industrielles et domestiques. Il est principalement extrait de minerais, dont les plus courants sont : [10]

I.2.1 Blende (Sphalerite) :



Figure I-2 : Sphalerite-Blende.

- **Composition chimique :** ZnS (sulfure de zinc)
- **Couleur :** Variable, souvent jaune, brun, noir ou rougeâtre
- **Forme :** Cristaux massifs, grenus ou lamellaires
- **Dureté :** 3,5 - 4 sur l'échelle de Mohs
- **Propriétés :** Clivage parfait, éclat adamantin, soluble dans l'acide chlorhydrique
- **Abondance :** Le minerai de zinc le plus répandu, représentant environ 80% de la production mondiale de zinc.

I.2.2 Smithsonite :



Figure I-3 : Smithsonite.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- **Composition chimique** : $ZnCO_3$ (carbonate de zinc)
- **Couleur** : Blanc, gris, jaune, brun ou vert
- **Forme** : Cristaux rhomboédriques, masses botryoïdales ou stalactitiques
- **Dureté** : 4 - 4,5 sur l'échelle de Mohs
- **Propriétés** : Soluble dans l'acide chlorhydrique, effervescence avec l'acide acétique
- **Abondance** : Moins répandu que la blende, mais important pour la production de zinc dans certaines régions.

I.2.3 Hélimorphite :



Figure I-4 : Minerais Hélimorphite.

- **Composition chimique** : $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ (silicate de zinc hydraté)
- **Couleur** : Blanc, gris, jaune, brun ou bleu
- **Forme** : Cristaux prismatiques ou tabulaires, masses lamellaires
- **Dureté** : 4,5 - 5 sur l'échelle de Mohs
- **Propriétés** : Clivage parfait, éclat nacré, insoluble dans les acides
- **Abondance** : Moins répandu que la blende et la smithsonite, mais une source importante de zinc dans certaines régions.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

I.2.4 Willemite :

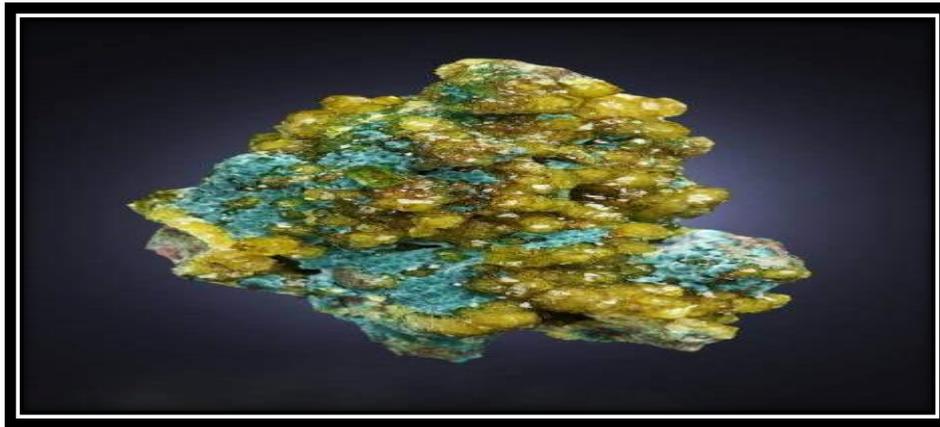


Figure I-5 : Minerai de Willemite.

- **Composition chimique** : Zn_2SiO_4 (silicate de zinc)
- **Couleur** : Blanc, gris, jaune, vert ou bleu
- **Forme** : Cristaux prismatiques ou tabulaires, masses grenues
- **Dureté** : 5,5 - 6 sur l'échelle de Mohs
- **Propriétés** : Fluorescence verte sous la lumière UV, insoluble dans les acides
- **Abondance** : Moins répandu que les autres minerais de zinc, mais une source importante de zinc dans certaines régions.

I.2.5 Franklinite :



Figure I-6 : Minerai de Franklinite.

- **Composition chimique** : $(Zn, Mn^{2+}, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$ (Oxyde de fer et de zinc)
- **Couleur** : Noir (rouge foncé en fragments translucides).
- **Forme** : Cristaux octaédriques, dodécaédriques ou cubiques, souvent massifs ou granulaires.
- **Dureté** : 5,5 - 6,5 sur l'échelle de Mohs.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- **Éclat** : Métallique à mat.
- **Propriétés** :
 - Magnétique (faiblement).
 - Soluble dans l'acide –chlorhydrique.
 - Ne présente pas de –fluorescence.
 - Densité : 5,18 g/cm³.

I.2.6 Zincite :



Figure I-7 : Zincite.

- **Composition chimique** : ZnO (Oxyde de zinc)
 - **Couleur** : Rouge, orange, jaune, brun, vert (rarement)
 - **Forme** : Cristaux hexagonaux prismatiques ou pyramidaux, Masses granulaires, lamellaires ou fibreuses
 - **Dureté** : 4 - 4,5 sur l'échelle de Mohs
 - **Éclat** : Adamantin à résineux.
- **Propriétés** :
- Soluble dans l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique Infusible.
 - Conductivité électrique élevée.
 - Photoluminescence (émission de lumière sous l'excitation de la lumière).
 - Densité : 5,67 g/cm³.
- ✓ **Note** : La Zincite est un minéral rare et n'est généralement pas trouvée en grandes quantités.

I.2.7 Hydrozincite :



Figure I-8 : Minerai de Hydrozincite.

- *Composition chimique* : $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ (carbonate de zinc hydroxyde).
- *Couleur* : Blanc, gris, jaune, bleuâtre.
- *Forme* :
- Cristaux lamellaires ou rhomboédriques
- Masses botryoïdales, stalactiformes ou en croûtes
- *Dureté* : 2 - 2,5 sur l'échelle de Mohs
- *Éclat* : Nacré à gras.

➤ **Propriétés :**

- Soluble dans l'acide.
- Chlorhydrique avec effervescence.
- Faible densité : 3,7 - 3,9 g/cm³.
- Indice de réfraction élevé.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

I.3 Gisements du zinc en Algérie

L'Algérie possède plusieurs gisements de zinc, dont les trois plus importants se situent dans les régions suivantes :

I.3.1 Gisement de Chaâbat-El-Hamra – Sétif

L'exploitation souterraine de la partie supérieure du gisement située à 12 km de la mine de Kharzet-Youcef a commencé en 1994 avec la mise en production de la mine de Chaâbat El-Hamra.

I.3.1.1 Localisation géographique

À vol d'oiseau, le gisement de Chaâbat-El-Hamra se trouve à 250 km au Sud-Est d'Alger, à 50 km au Sud de Sétif, dans la région de Chouf-Bouarket, à 4,5 km d'Ain-Azel et à 12 km au Sud-Est du complexe minier de Kherzet-Youcef.

Les coordonnées géographiques du point central sont : 35°45'N et 5°30'E. L'altitude du site varie de 950 m à 1200 m (Figure I.10).

Les coordonnées Lambert sont :

X : de 754000 m à 755000 m ; Y : de 279750 m à 280400 m ; Z : 1066 m et 1024 m.

Le climat est semi-aride, hivernant froid et estivant chaud. La moyenne annuelle des précipitations est de 322 mm et elle ne dépasse que rarement les 500 mm. La moyenne annuelle de température est de 15 °C. [20].

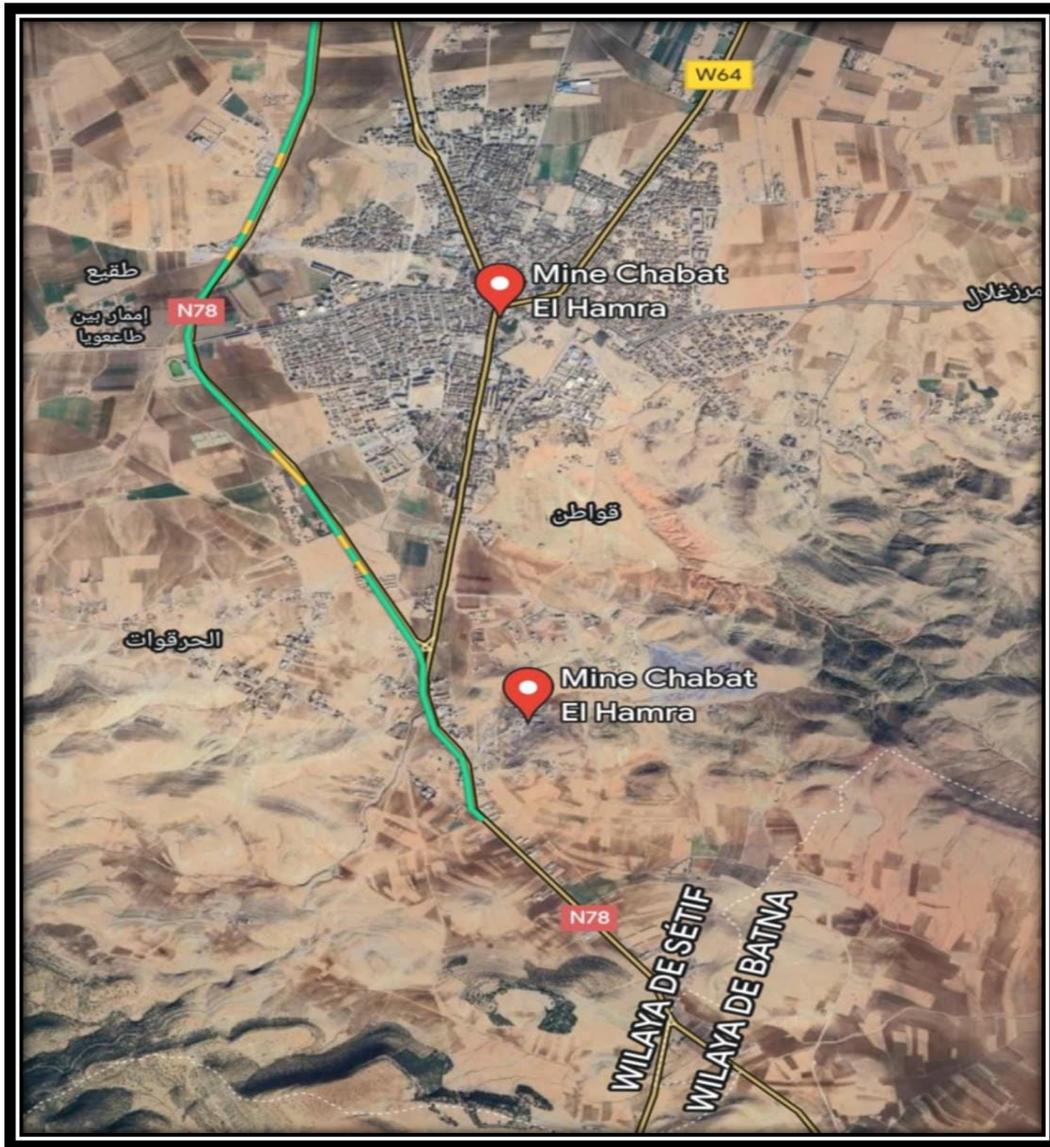


Figure I-9 : Situation géographique du gisement Chaâbat-El-Hamra [Source : Google Earth].

I.3.1.2 Historique de la mine de Chaâbat-El-Hamra

Le gisement de Chaâbat-El-Hamra est connu depuis longtemps, il a fait l'objet d'exploitation des affleurements de calamines de 1910 à 1920 et de 1936 à 1941. Beaucoup plus tard, les travaux d'exploration par forages ont été entrepris afin d'établir l'extension des zones connues.

Après la nationalisation des mines en 1966, le gisement de Chaâbat-El-Hamra a fait l'objet de premiers travaux de prospection géologique de 1967 à 1988, suivis ensuite de travaux d'évaluation par sondages à maille régulière de 50 x 100 m et de 100 x 100 m, de 1989 à 1991.

En 1991 et suite au coup d'eau survenu le 02 juin 1990 à la mine de Kherzet-Youcef et qui a mis fin à l'exploitation du gisement, l'ENOF a élaboré un premier dossier de recherche

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

détaillée par ouvrages miniers sur le gisement de Chaâbat-El-Hamra. Les travaux miniers ont démarré en janvier 1992 et les ouvrages d'accès ont été achevés en avril 1994.

La mine de Chaâbat-El-Hamra a démarré l'extraction du tout-venant en avril 1994 tout en continuant à réaliser des travaux de recherche au fond pour préciser les réserves géologiques et les conditions hydrogéologiques.

Les résultats financiers de la mine ont été toujours déficitaires, ce qui a poussé l'ENOF à engager périodiquement des analyses et évaluations technico-économiques [21].

I.3.1.3 Pétrographie et minéralogie du gisement

Le gisement de Chaâbat-El-Hamra présente une composition minéralogique relativement simple. La nature du minerai est disséminée. Les sulfures représentent la minéralisation, avec les principales minérales métallogénies telles que la sphalérite, la pyrite et la marcasite. L'hématite, la witherite et la baryte sont des minéraux secondaires.

La dolomie, la calcite et plus rarement le quartz et le gypse sont des minéraux de gangue. La smithsonite, la cérusite, la limonite et l'hydrogoéthite sont présentes dans la zone d'oxydation. Les minéraux sont habituellement représentés en filonnets, ou en amas, et parfois en fines couches d'environ 4 à 5 mètres. Les minéralisations principales présentes dans le minerai du gisement de Chaâbat-El-Hamra comprennent :

a. Sphalérite

En général, elle se manifeste sous la forme d'agrégats monocristallins de 10 mm ou de cristaux élastiques isolés de 0,08 à 0,3 mm. La présence de pyrite, de marcasite et de dolomie secondaire est associée à cela.

b. Pyrite

- Formée de fines particules xénomorphes, dispersées dans la dolomie ;
- Formée d'agrégats (de 0,3 à 0,5 mm) ;
- Formée de filonnets de 10 à 15 cm de long.

Les cristaux de pyrite de la première génération sont dispersés dans la gangue de la dolomie (0,05 mm).

La seconde génération de pyrite est constituée d'agrégats cristallins aplatis. Les cristaux ont une forme subautomorphe (mesurant de 0,3 à 1,2 mm).

c. Marcasite

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

Elle se manifeste sous la forme de cristaux agrégats aplatis.

d. Galène

La présence de barytine en cristaux subautomorphes est rare, mais elle peut également être présente sous forme d'inclusion dans la dolomie blanche.

e. Barytine

Elle est rarement observée, se manifestant sous la forme de filonnets monominéraux qui créent des vides dans le minerai pyriteux de couloir blanchâtre. Elle forme des agrégats avec une structure tubulaire en masse lamellaire.

f. Dolomie

Sa présence joue un rôle crucial dans la formation de la gangue des corps minéraux et des roches encaissantes. Deux générations de dolomies sont distinguées :

La dolomie I, qui est précoce, et la dolomie II, qui est tardive (avec des cristaux plus gros). Elle est caractérisée par des formes bien développées, de couleur blanche, et elle se développe après la formation de la blende. Elle fait partie des roches encaissantes. [21]

I.3.2 Autres gisements

Il existe également d'autres gisements de zinc en Algérie, tel que :

- Tala Hamza-Oued Amizour- Béjaïa : 68 Mln tonne de minerai, 5% en zinc et 1% de Pb. [11]
- Elabed-Tlemcen : 20 Mln tonne de minerai, 6% en zinc.
- Oued El Kebir : 11.52 Mln tonnes de minerai, 2.09 % en Zn et 2.63 % de Pb.
- Achab : 1.23 Mln tonnes de minerai, 1.66 % en Zn et 1.92 % de Pb.
- Tiri : 2.87 Mln tonnes de minerai, 3.37 % en Zn et 2.27 % de Pb.
- Boudoukha : 3.81 Mln tonnes de minerai, 5.84 % en Zn et 1.04 % de Pb.
- Ain Barbar : 1.86 Mln tonnes de minerai, 4.30 % en Zn et 1.40 % de Pb.
- Guerrouma : 3 Mln tonnes de minerai, 6.45 % en Zn et 1.85 % de Pb.
- Boukhdema : 8.38 Mln tonnes de minerai, 4.89 % en Zn et 2.32 % de Pb.
- Ain Sedjra : 3 Mln tonnes de minerai, 12 % en Zn.
- Kef Semmah : 2 Mln tonnes de minerai, 5 % en Zn.
- Hammam N'Bails : 2.4 Mln tonnes de minerai, 5.30% en Zn et 1.50 % en Pb.
- Chaâbat El Hamra : 4.8 Mln tonnes de minerai, 5.40 % en Zn.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- Ain Kahla : 7 Mln tonnes de minerai, 9.37 % en Zn et 1.79 % de Pb.

La carte géographique suivante présente la localisation des différents gites et gisements dans l'Algérie parmi les gisements de zinc susmentionné :

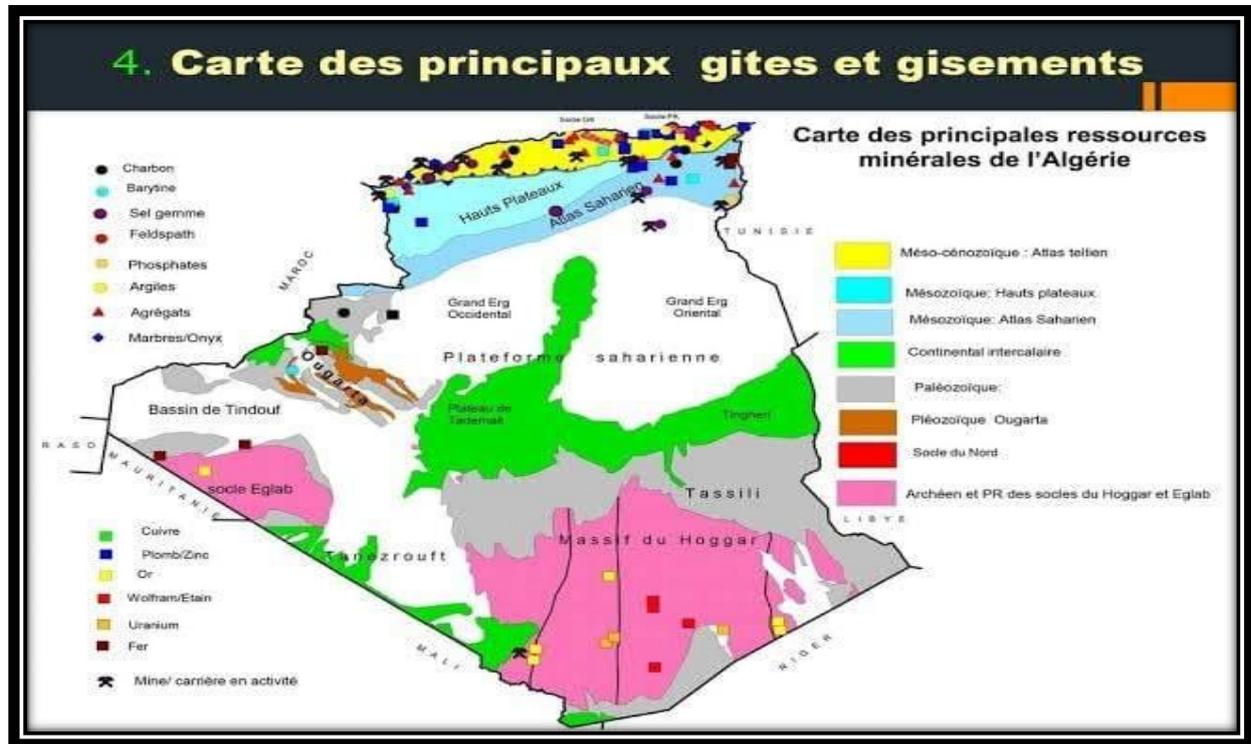


Figure I-10 : Carte géographique des principaux gites et gisements en Algérie. [12]

I.4 Étude des méthodes d'extraction du zinc utilisés dans l'industrie

L'industrie du zinc utilise deux principales méthodes d'extraction : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie. [13]

I.4.1 Pyrométallurgie

Ce procédé comporte les opérations suivantes :

- grillage de la blende pour obtenir le zinc sous forme d'oxyde de zinc (ZnO)
- réduction de l'oxyde pour obtenir du zinc métallique (Zn),
- affinage du zinc par liquation et distillation pour supprimer les impuretés comme le

Plomb ou le fer.

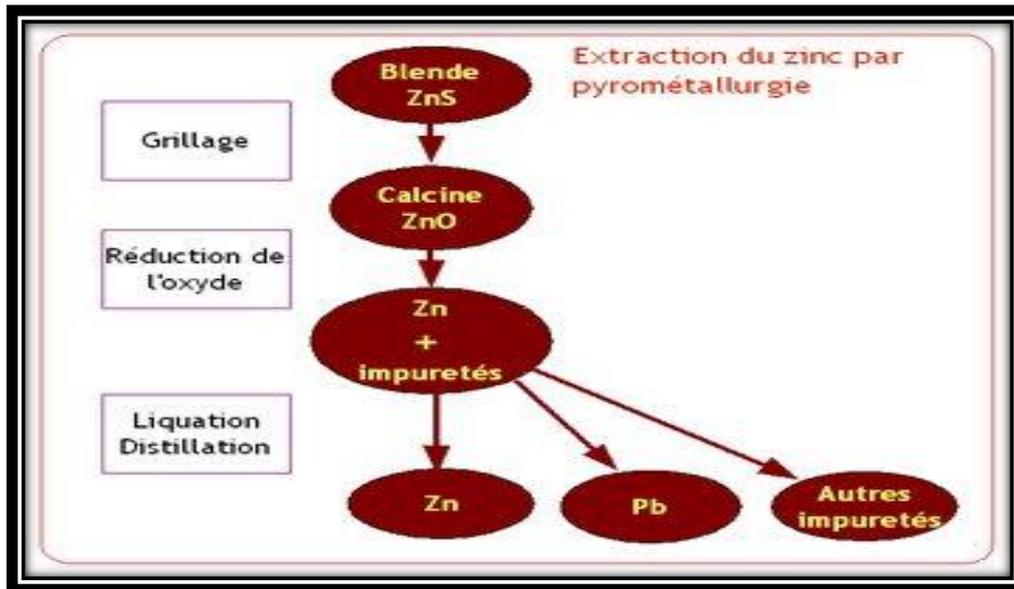


Figure I-11 : Opérations technologiques d'extraction du zinc par Pyrométallurgie. [13]

I.4.1.1 Grillage

Le grillage est une étape importante dans le traitement des minerais de zinc pour produire du zinc métallique. Le processus implique de chauffer le minerai de zinc à haute température en présence d'air, ce qui convertit le sulfure de zinc (ZnS) en oxyde de zinc (ZnO).

Le grillage peut être effectué de différentes manières :

➤ Grillage en lit fluidisé

Ce procédé utilise un lit fluidisé de particules de minerai de zinc qui sont suspendues dans un courant d'air chaud. Le lit fluidisé assure un bon contact entre le minerai et l'air, ce qui permet une réaction rapide et complète.

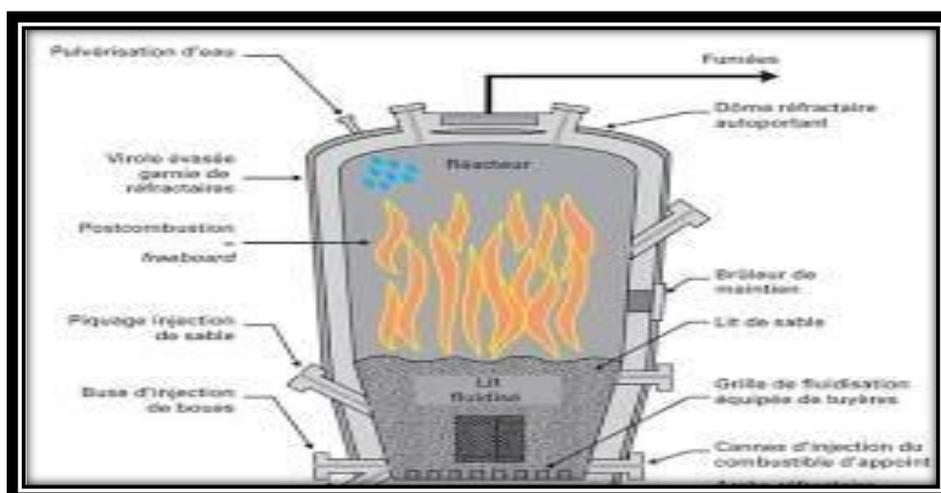


Figure I-12 : Grillage en lit fluidisé.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

➤ Grillage à multiple foyer

Ce procédé utilise une série de foyers pour chauffer progressivement le minerai de zinc. Le minerai est déplacé d'un foyer à l'autre, ce qui permet d'obtenir une conversion plus complète du sulfure de zinc en oxyde de zinc.

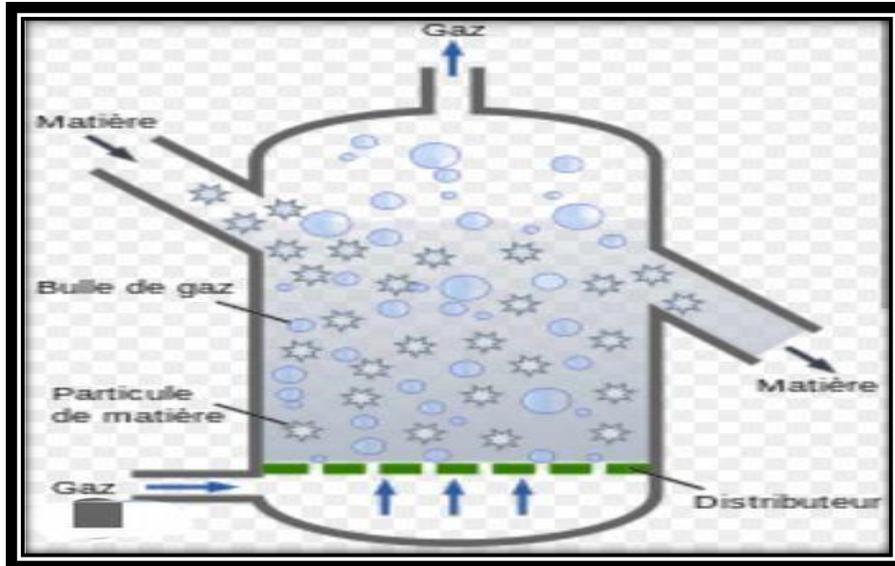


Figure I-13 : Grillage à multiple foyer.

➤ Grillage en suspension

Ce procédé utilise un gaz chaud pour transporter le minerai de zinc finement broyé dans un réacteur. Le minerai est rapidement chauffé et converti en oxyde de zinc.

Les réactions chimiques qui se produisent pendant le grillage sont les suivantes :

- $2\text{ZnS} + 3\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{ZnO} + 2\text{SO}_2$
- $\text{ZnS} + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{ZnSO}_4$

Le grillage produit deux produits principaux :

- **Calcine** : C'est l'oxyde de zinc (ZnO) qui est ensuite utilisé pour produire du zinc métallique.
- **Gaz à haute teneur en dioxyde de soufre** : Ce gaz est ensuite transformé en acide sulfurique.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

I.4.1.2 Réduction

La réduction du zinc est l'étape suivante après le grillage dans le processus d'extraction du zinc. Elle consiste à convertir l'oxyde de zinc (ZnO) obtenu après le grillage en zinc métallique (Zn).

Deux méthodes principales sont utilisées pour la réduction du zinc :

➤ Réduction carbothermique

- **Procédé :** L'oxyde de zinc est mélangé avec du coke (carbone) et chauffé à haute température (environ 1250°C) dans un four. Le carbone réagit avec l'oxyde de zinc pour produire du zinc métallique et du monoxyde de carbone.

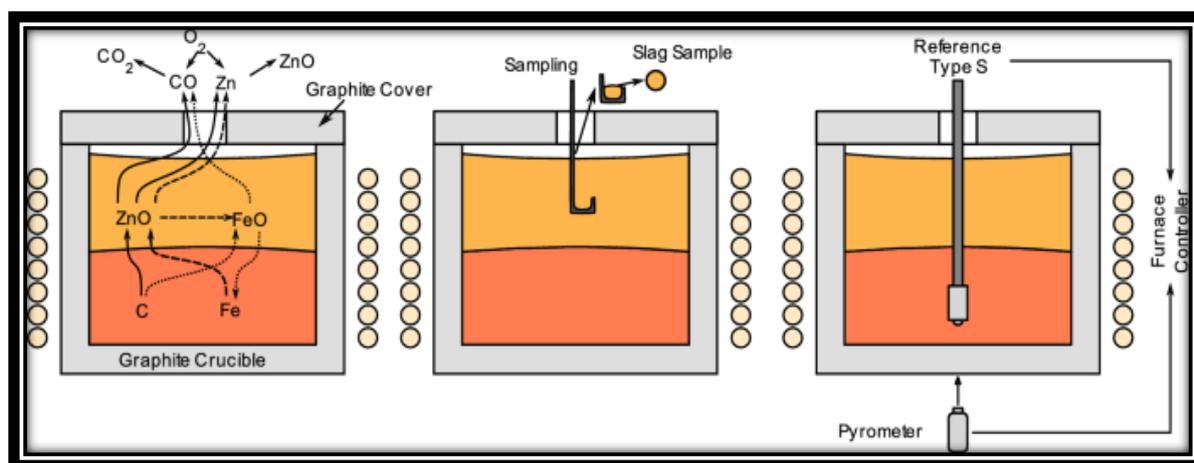


Figure I-14 : Réduction carbothermique du zinc.

➤ Réaction chimique : $ZnO + C \Rightarrow Zn + CO$

➤ Avantages :

- Procédé simple et bien établi.
- Adapté aux minerais de zinc à haute teneur en oxyde.

➤ Inconvénients :

- Consommation importante de coke et d'énergie.
- Génération de gaz à effet de serre (monoxyde de carbone).

I.4.1.3 Électrolyse

➤ **Procédé :** L'oxyde de zinc est dissous dans un bain d'acide sulfurique pour obtenir une solution de sulfate de zinc. Le zinc est ensuite extrait de la solution par électrolyse.

➤ **Réaction chimique :** $ZnSO_4 + H_2O \rightarrow Zn + H_2SO_4 + O_2$

➤ **Avantage :**

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- Procédé plus propre et plus économe en énergie que la réduction carbothermique.
- Adapté aux minerais de zinc à faible teneur en oxyde.
- **Inconvénients :**
 - Procédé plus complexe et moins flexible que la réduction carbothermique.
 - Coût d'investissement initial plus élevé.

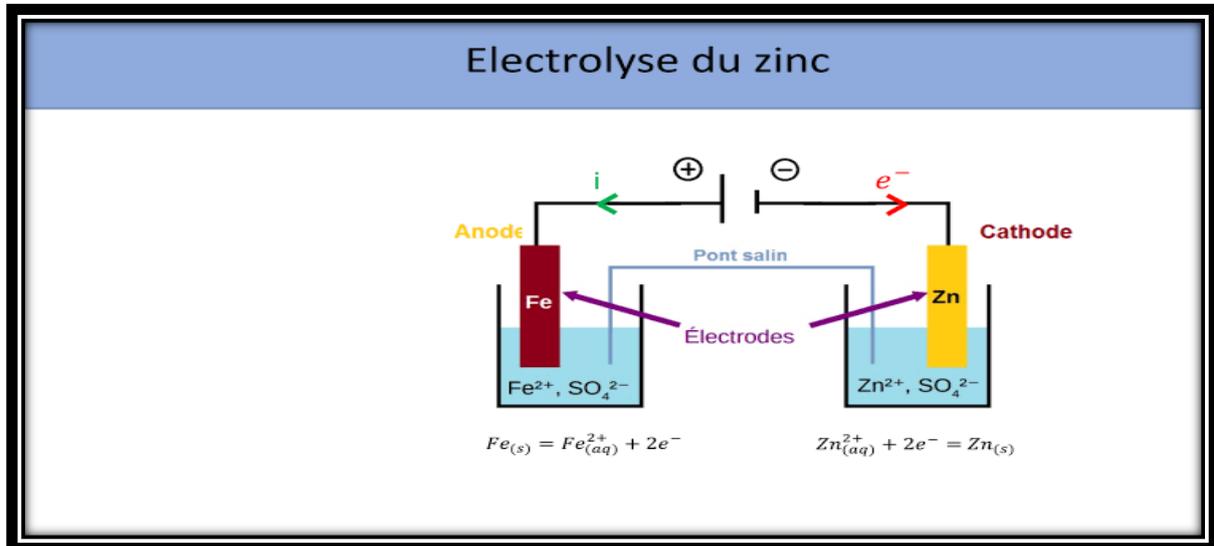


Figure I-15 : Électrolyse du zinc.

Le choix de la méthode de réduction du zinc dépend de plusieurs facteurs :

- **Nature du minerai de zinc :** La teneur en oxyde de zinc et la présence d'impuretés influencent le choix de la méthode.
- **Exigences de production :** La capacité de production souhaitée et la qualité du zinc produit sont des facteurs importants.
- **Contraintes environnementales :** Les émissions de gaz à effet de serre et la pollution doivent être prises en compte.

I.4.1.4 Affinage du zinc

L'affinage du zinc est l'étape finale de l'extraction du zinc, après la réduction de l'oxyde de zinc en zinc métallique. Son objectif est de purifier le zinc brut et d'obtenir un produit final de haute qualité répondant aux exigences industrielles.

- **Affinage :** liquation, distillation :

Le zinc obtenu lors des opérations précédentes contient encore du plomb et d'autres impuretés (fer, cadmium à des proportions de l'ordre de 0,1%).

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

Pour augmenter le titre en zinc, il est affiné par deux opérations : la liquation et la distillation. La liquation est basée sur une différence de miscibilité entre le plomb et le zinc à une température comprise entre 430 et 440°C.

De même la solubilité du fer décroît fortement lorsque l'on refroidit le mélange fer zinc. En traitant le zinc issu des opérations précédentes dans un four à réverbère à une température comprise entre 430 et 440°C pendant un à deux jours, on sépare : le zinc qui contient encore 0,9 % de plomb de ce qui s'appelle la 'matte de zinc' contenant du plomb, 5 à 6 % de zinc et un composé ferreux de composition $FeZn_{13}$. [14]

Pour obtenir un zinc pur, il faut passer par une opération de distillation fractionnée qui permet de séparer les différents constituants métalliques en jouant sur leurs températures de fusion.

Pour cela, on chauffe le mélange de métaux pour le rendre gazeux. A l'aide de diverses colonnes de distillation on sépare les métaux en les condensant. [15]

I.5 Hydrométallurgie

Ce procédé comporte après grillage de la blende les opérations de lixiviation pour solubiliser le zinc sous forme de sulfate de zinc $ZnSO_4$.

La cémentation pour éliminer les impuretés : Cobalt, Nickel, Cadmium et Cuivre de la solution de sulfate de zinc.

Les opérations d'extraction du zinc seront terminées par l'électrolyse qui transforme $ZnSO_4$ en zinc par dépôt solide électrolytique. [17]

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

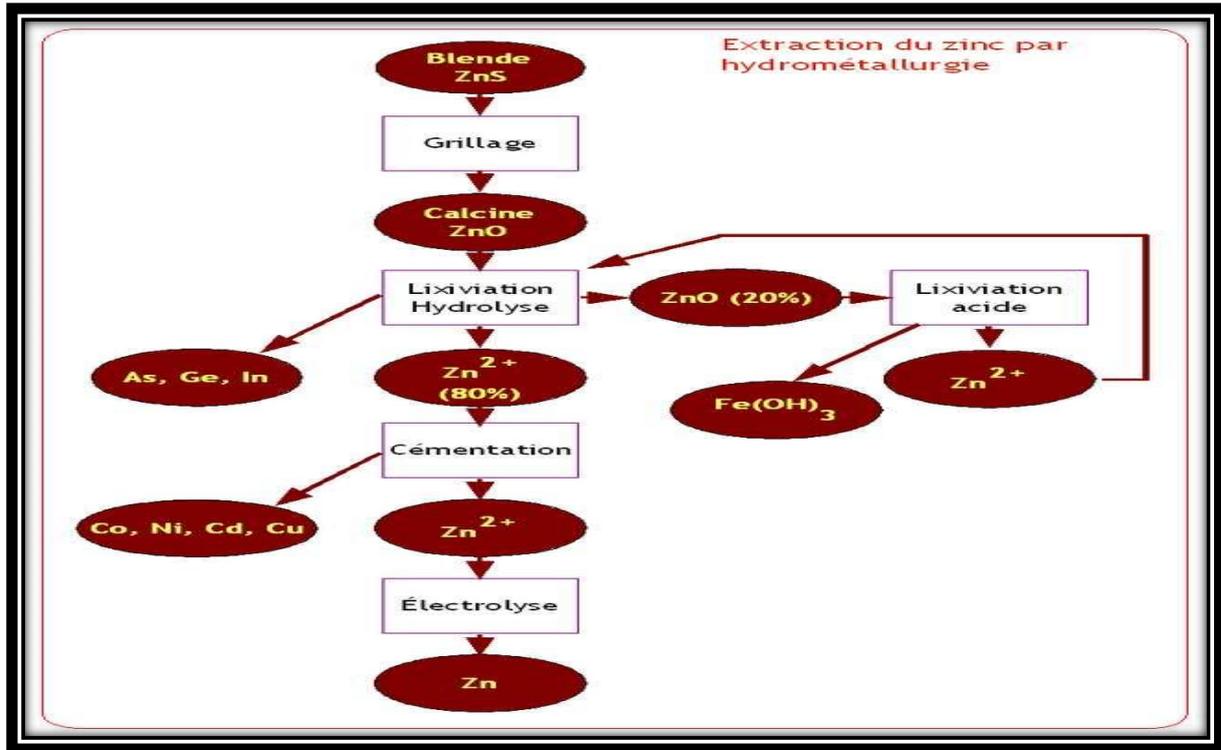


Figure I-16 : Procédé d'extraction du zinc par hydrométallurgie. [13]

I.5.1 Grillage

Deux types de grillage sont utilisés en hydrométallurgie du zinc :

I.5.1.1 Grillage oxydant

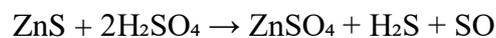
- Ce type de grillage est réalisé en présence d'air ou d'oxygène.
- La réaction chimique principale est la suivante :



- Le dioxyde de soufre (SO_2) est un gaz qui peut être récupéré et transformé en acide sulfurique ou en d'autres produits chimiques.

I.5.1.2 Grillage sulfatant

- Ce type de grillage est réalisé en présence d'acide sulfurique.
- La réaction chimique principale est la suivante :



- L'acide sulfurique dissout le ZnS pour former du sulfate de zinc (ZnSO_4).
- Le gaz H_2S et SO_2 peuvent être récupérés et valorisés

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

I.5.2 Lixiviation

La lixiviation est une étape cruciale dans l'hydrométallurgie du zinc, et elle consiste à dissoudre le zinc présent dans le minerai sous forme d'ions solubles dans une solution aqueuse. Cette solution est ensuite utilisée pour extraire et purifier le zinc par des techniques ultérieures telles que l'électrodéposition.

Voici les étapes clés de la lixiviation du zinc en hydrométallurgie :

I.5.2.1 Préparation de la pulpe

Le minerai de zinc, broyé en poudre fine, est mélangé à de l'eau pour former une suspension épaisse appelée pulpe. L'ajout d'un agent dispersant peut être nécessaire pour empêcher les particules de minerai de s'agglomérer.

I.5.2.2 Agent du lixiviant

- Un agent chimique appelé lixiviant est ajouté à la pulpe pour dissoudre le zinc.
- L'acide sulfurique (H_2SO_4) est le lixiviant le plus couramment utilisé en raison de son efficacité pour dissoudre le zinc présent dans les minerais sulfurés (ZnS), qui constituent la majorité des minerais de zinc.

I.5.2.3 Réaction de lixiviation

La réaction chimique de lixiviation pour le sulfure de zinc avec l'acide sulfurique s'écrit : $\text{ZnS} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{S}$

- Cette réaction dissout le zinc (Zn) sous forme d'ions zinc (Zn^{2+}) dans la solution aqueuse.
- Des impuretés présentes dans le minerai peuvent également se dissoudre dans la solution en fonction de leur solubilité dans l'acide sulfurique. [17]

I.5.2.4 Contrôle des paramètres de lixiviation

Plusieurs paramètres influencent l'efficacité de la lixiviation, notamment :

- ✓ La concentration de l'acide sulfurique,
- ✓ La température de la solution,
- ✓ Le temps de réaction,
- ✓ La taille des particules de minerai,
- ✓ Le rapport solide/liquide (rapport entre la quantité de minerai et la quantité de solution).

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- L'optimisation de ces paramètres est essentielle pour maximiser la récupération du zinc tout en minimisant la dissolution des impuretés. [16]

I.5.2.5 Séparation de la solution et du résidu

- Une fois la réaction de lixiviation terminée, la solution contenant les ions zinc et les impuretés dissoutes est séparée du résidu solide, qui contient principalement des gangues et des impuretés insolubles.
- Différentes techniques de séparation, telles que la filtration et la sédimentation, peuvent être utilisées.

La solution obtenue après la lixiviation est ensuite acheminée vers des étapes de purification ultérieures, telles que l'extraction par solvants ou la précipitation, pour éliminer les impuretés et obtenir une solution riche en ions zinc prête pour l'électrodéposition.

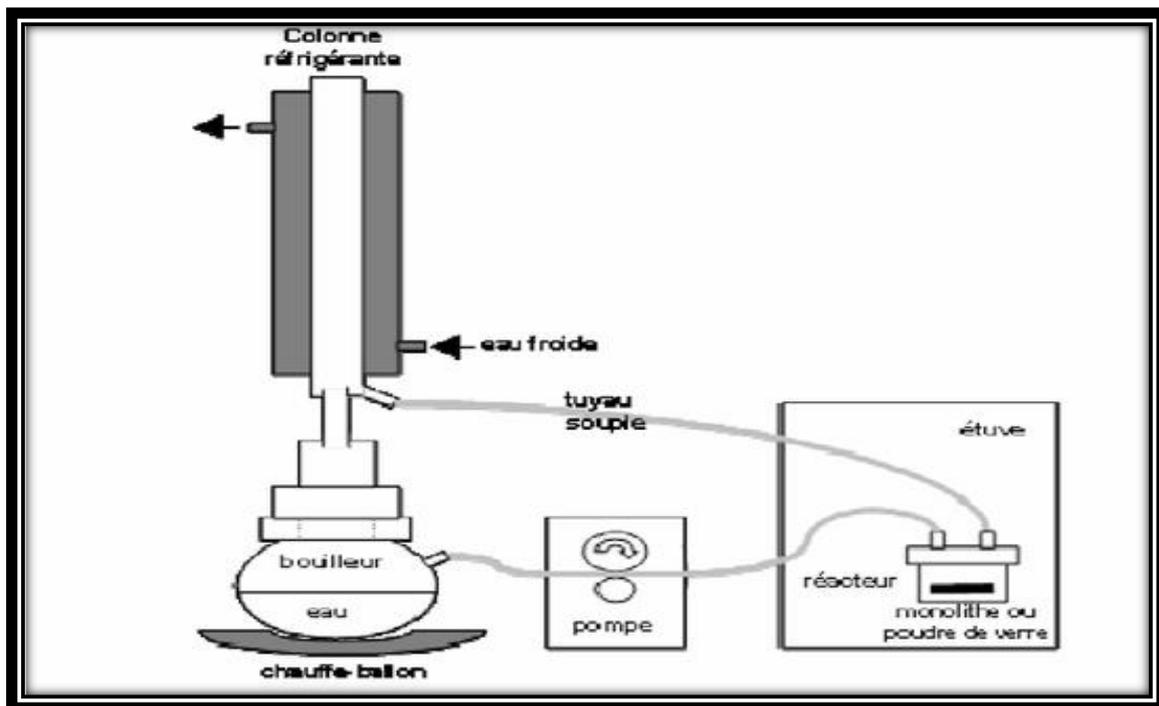


Figure I-17 : Schéma simplifié le principe de lixiviation.

❖ Avantages de la lixiviation en hydrométallurgie du zinc

- **Sélection du zinc** : La lixiviation permet de dissoudre sélectivement le zinc et de le séparer des autres minéraux présents dans le minerai.
- **Adaptabilité** : La lixiviation peut être adaptée à différents types de minerais de zinc en utilisant des lixiviants appropriés.
- **Potentiel de valorisation** : La solution de lixiviation peut contenir des éléments d'intérêt économique qui peuvent être récupérés et valorisés.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

➤ Inconvénients de la lixiviation en hydrométallurgie du zinc

- *Formation de sous-produits indésirables* : La lixiviation peut générer des gaz et des effluents liquides qui nécessitent un traitement et une gestion appropriés pour éviter la pollution de l'environnement.
- *Consommation d'agents chimiques* : L'utilisation de lixiviants comme l'acide sulfurique implique des coûts et des aspects de sécurité à prendre en compte.

I.5.3 Purification

- La solution obtenue après la lixiviation contient des ions zinc et des impuretés provenant d'autres minéraux présents dans le minerai.
- Plusieurs techniques de purification peuvent être employées pour éliminer les impuretés, telles que :
- *Extraction par solvants* : Utilisation de solvants organiques pour extraire sélectivement les ions zinc de la solution aqueuse.
- *Précipitation* : Ajout de produits chimiques pour précipiter les impuretés hors de la solution.
- *Échange d'ions* : Utilisation de résines échangeuses d'ions pour échanger les ions zinc contre d'autres ions présents dans la solution.

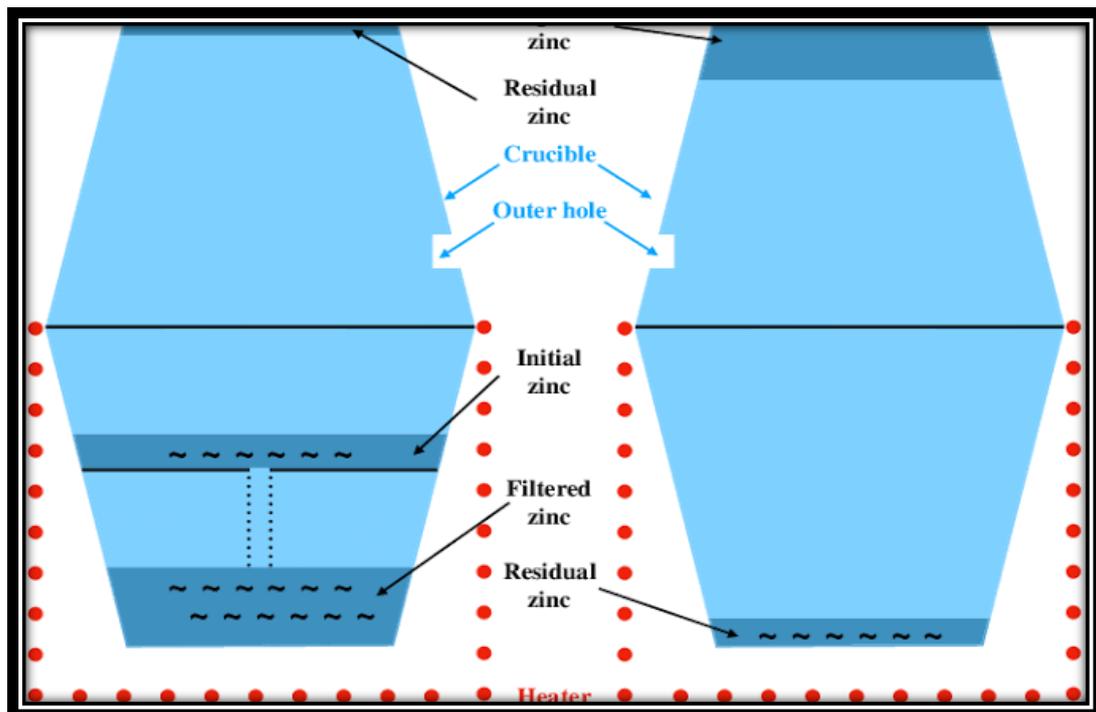


Figure I-18 : purification de zinc.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

➤ Le choix de la technique de purification dépend de plusieurs facteurs :

- Nature des impuretés : La composition et les caractéristiques des impuretés présentes dans la solution influencent le choix de la technique la plus appropriée.
- Exigences de pureté du produit final : Le niveau de pureté requis pour le zinc final détermine le degré de raffinement nécessaire.
- Coût et complexité : Les coûts d'investissement, d'exploitation et la complexité de la mise en œuvre sont des facteurs importants à prendre en compte.

I.5.4 Électrodéposition

L'électrodéposition est l'étape finale de l'extraction du zinc par hydrométallurgie et permet de transformer la solution finale purifiée en zinc métallique pur.

I.5.4.1 Principe de fonctionnement

- Solution et électrodes :** La solution finale obtenue après les étapes de lixiviation et de purification, riche en ions zinc (Zn^{2+}), est placée dans un électrolyseur. Deux électrodes sont immergées dans la solution :
 - ✓ **Cathode :** Une cathode en acier inoxydable est chargée négativement (pôle négatif).
 - ✓ **Anode :** Une anode en plomb est chargée positivement (pôle positif).
- Flux d'électrons :** Un courant électrique continu externe est appliqué à l'électrolyseur. Les ions zinc en solution migrent vers la cathode chargée négativement.
- Réduction des ions zinc :** À la surface de la cathode, les ions zinc captent des électrons du courant électrique et se réduisent en zinc métallique : $Zn^{2+} (aq) + 2e^{-} \rightarrow Zn(s)$.

Le zinc métallique se dépose sur la cathode sous forme de dépôt solide et compact.

- Oxydation à l'anode :** À l'anode chargée positivement, l'eau (H_2O) de la solution se décompose en oxygène gazeux (O_2) et libère des électrons : $2H_2O (l) \rightarrow 4H^{+} (aq) + O_2 (g) + 4e^{-}$. Les électrons libérés à l'anode sont conduits à travers le circuit électrique externe pour atteindre la cathode et participer à la réduction des ions zinc.
- Contrôle du processus :** L'électrodéposition est un processus électrochimique qui nécessite un contrôle des paramètres suivants :
 - ✓ *Densité de courant :* Détermine la vitesse de dépôt du zinc et son épaisseur.
 - ✓ *Température de la solution :* Influence la conductivité de la solution et la cinétique de la réaction.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

- ✓ *Concentration des ions zinc* : Affecte la vitesse de dépôt et la qualité du zinc.
- ✓ *pH de la solution* : Un pH légèrement acide est optimal pour l'électrodéposition du zinc.

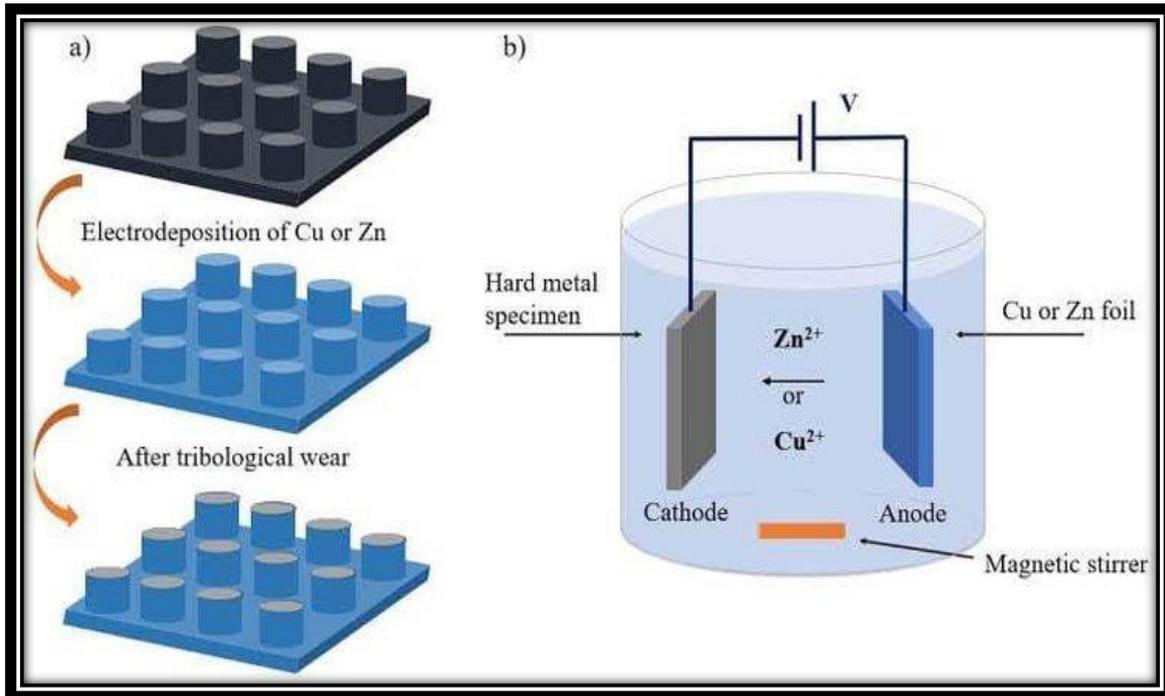


Figure I-19 : Processus d'électro déposition.

➤ **Avantages de l'électrodéposition du zinc :**

- **Haute pureté du produit final** : L'électrodéposition permet d'obtenir du zinc de très haute pureté, en fonction des conditions de fonctionnement.
- **Adaptabilité** : Le procédé peut être adapté à différentes échelles de production en ajustant la taille de l'électrolyseur.
- **Processus relativement propre** : L'électrodéposition ne produit pas de gaz à effet de serre et limite les rejets polluants par rapport à la pyrométallurgie.

➤ **Inconvénients de l'électrodéposition du zinc :**

- **Consommation d'énergie** : L'électrodéposition est un procédé énergivore, et son efficacité dépend de la source d'énergie utilisée.
- **Coût d'investissement** : L'installation et la maintenance des électrolyseurs nécessitent un certain investissement initial.
- **Gestion des effluents** : Les solutions épuisées issues de l'électrodéposition doivent être traitées et gérées de manière appropriée pour éviter la pollution de l'environnement.

CHAPITRE I - GENERALITES SUR LE ZINC

I.6 Conclusion

Le zinc est un élément métallique utilisé dans divers produits en raison de ses propriétés anticorrosives. Ses minerais, principalement la sphalérite (sulfure de zinc), sont extraits dans des gisements à travers le monde. L'industrie du zinc utilise deux principales méthodes d'extraction : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

Introduction

Lorsque le résidu solide contient une part importante du zinc, il est nécessaire de le récupérer pour l'amélioration du rendement et de la rentabilité de l'extraction. Pour ce faire, il faut tenir compte de plusieurs paramètres qui influent directement sur le taux de récupération. La méthodologie que nous avons employée consiste à produire un résidu solide à partir des essais de laboratoire en procédant à une double méthode d'extraction acide en utilisant comme solution d'attaque, la solution d'acide sulfurique. Tout en modifiant la cinétique de la réaction.

Nous présenterons les méthodes d'analyses que nous avons employées dans cette étude et une description du matériel utilisé.

II.1 Conditionnement du minerai

Les échantillons à traiter et à analyser ont été prélevés soigneusement des sites précieux du gisement de Chaâbat al Hamra au sein du tas appartenant à une micro entreprise (SARL Tinmerkadin Ech 82).

Le prélèvement de l'échantillon a été effectué soigneusement afin d'éviter toute erreur pouvant provenir de la contamination ou de la pollution par des produits étrangers.

II.1.1 Échantillonnage

Le but de l'échantillonnage est de s'assurer de la représentativité de l'échantillon ramené au laboratoire, c'est-à-dire de s'assurer que la petite fraction à analyser est la plus représentative possible de la masse mère. Nous avons échantillonné le minerai issu du gisement de Chaâbat Al Hamra au sein du tas appartenant à une micro entreprise (SARL Tinmerkadin Ech 82) en prélevant des échantillons représentatifs du bas en haut et sur tout le tour.

Pour l'échantillonnage, nous avons opté pour la méthode d'échantillonnage systématique qui est une méthode d'échantillonnage probabiliste (figure II-1). Elle permet la sélection d'un échantillon représentatif du matériau stocké dans un digue de stockage. Cette méthode assure que chaque partie de la digue a une chance égale d'être sélectionnée, ce qui permet d'obtenir une estimation précise de la composition moyenne du minerai. Le poids total du minerai échantillonné est environ de 50kg.

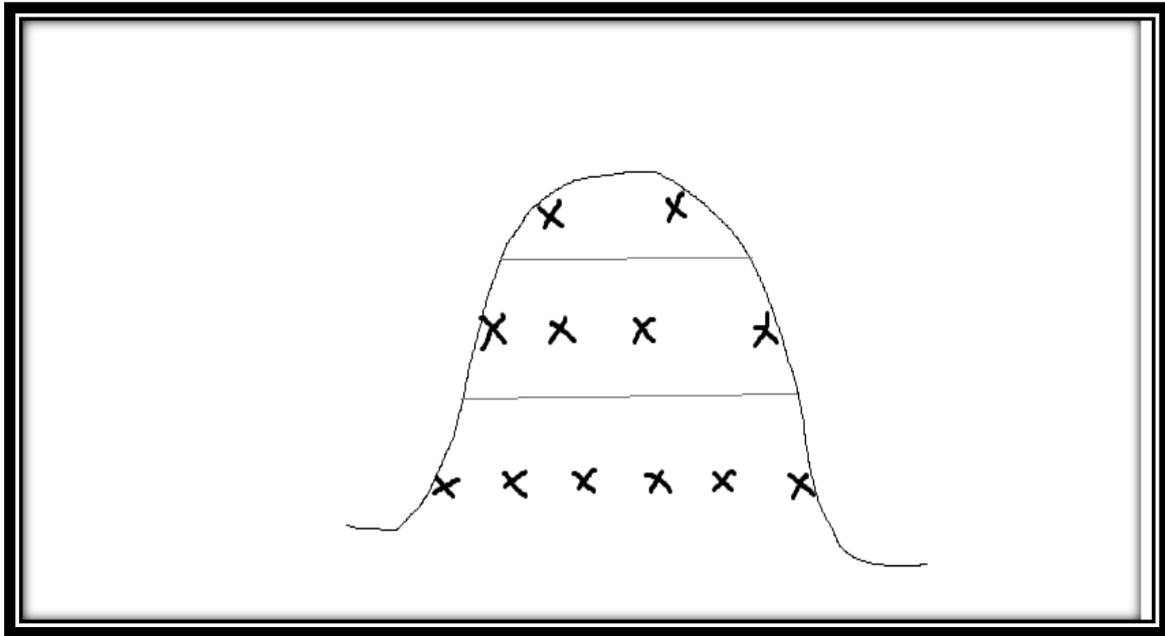


Figure II-1 : schéma d'échantillonnage systématique.

II.2 Préparation mécanique

La préparation mécanique est un processus essentiel qui transforme le minerai de zinc brut en un concentré de minerai prêt à être traité par des procédés métallurgiques pour extraire le métal pur. Cette étape implique une série d'opérations unitaires visant à concasser, broyer, tamiser et classifier le minerai pour enrichir la teneur en zinc et éliminer les impuretés de la gangue. L'organigramme (Figure II.2) explique le chemin suivi lors de notre travail.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

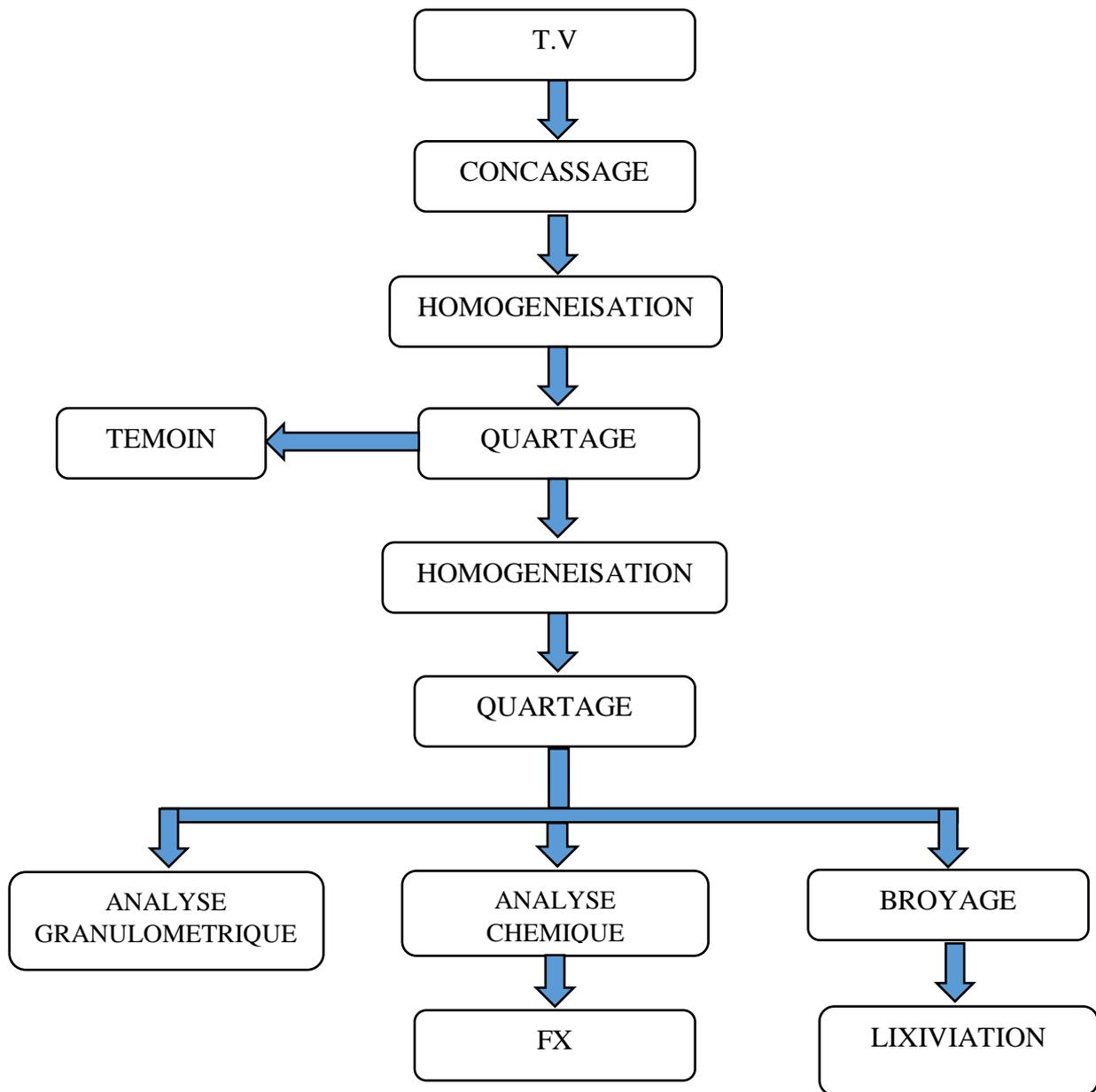


Figure II-2 : Organigramme de préparation du minerai pour essais et analyses.

a. Le concassage

Le concassage est une étape cruciale dans la préparation mécanique du minerai, visant à réduire la taille des morceaux de minerai brut en particules plus fines d'une taille maximale de 10 mm. Cette étape est généralement réalisée à l'aide de concasseurs, des machines conçues pour briser les matériaux solides en fragments plus petits.

Lors de notre travail, nous avons concassé la masse du minerai de 50kg dans un concasseur à mâchoire avec une ouverture de 2 mm.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

Le Concasseur à mâchoires utilisé possède deux mâchoires mobiles qui se rapprochent et s'éloignent l'une de l'autre pour broyer le minerai. Il est adapté aux gros morceaux de minerai et peut produire une granulométrie grossière.



Figure II-3 : Photo du concasseur a mâchoire (laboratoire du département).

b. Homogénéisation

L'homogénéisation du minerai concassé de zinc, visant à créer un mélange uniforme de particules de minerai de différentes tailles et propriétés. Cette étape est essentielle pour assurer une alimentation régulière et constante aux étapes ultérieures de traitement, telles que le tamisage et la classification.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

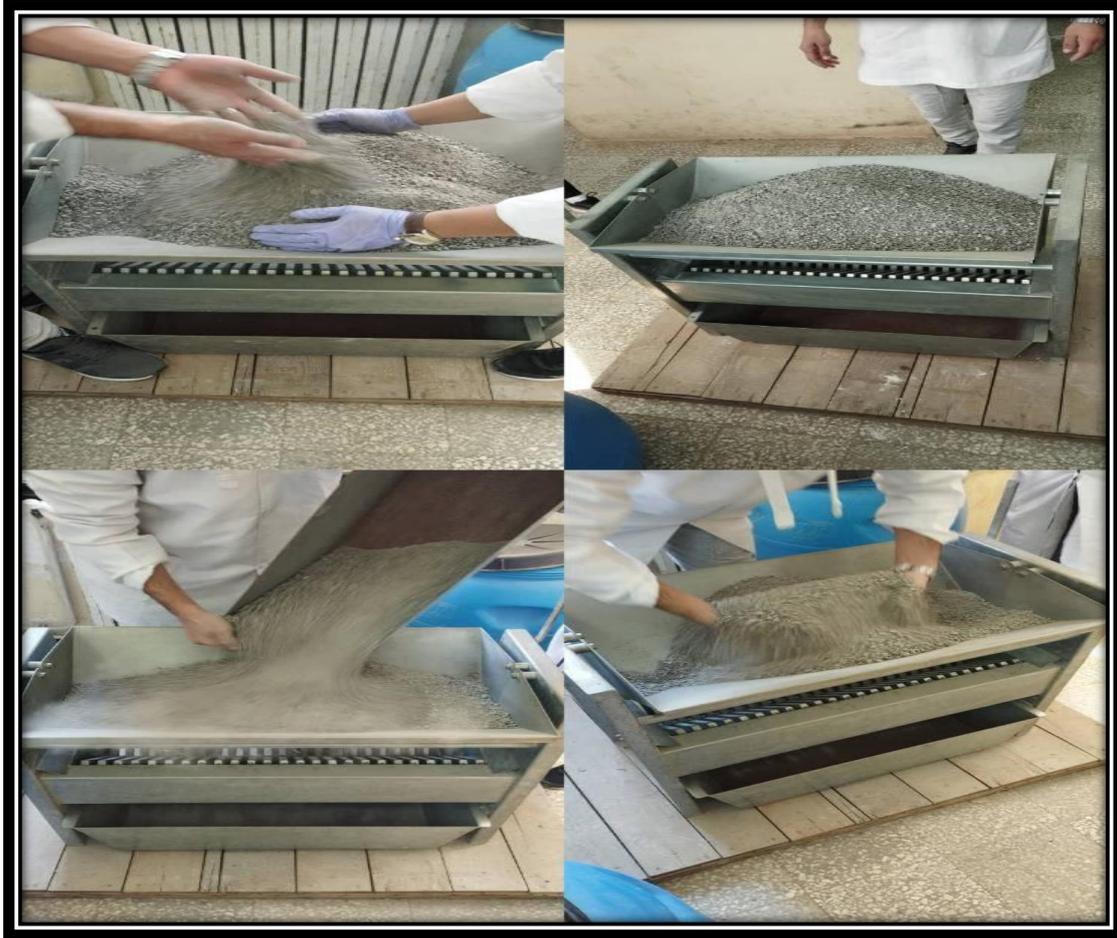


Figure II-4 : Photo de l'homogénéisation du minerai concassé.

➤ Objectifs de l'homogénéisation

- Réduire la ségrégation des particules : Éliminer la séparation des particules de minerai en fonction de leur taille ou de leurs propriétés, garantissant une distribution uniforme des particules dans le mélange.
- Améliorer la fluidité du minerai : Faciliter l'écoulement du minerai concassé dans les convoyeurs et les alimentateurs des étapes ultérieures de traitement.
- Optimiser les performances du traitement : Assurer une alimentation régulière et constante des procédés de traitement, améliorant ainsi leur efficacité et leur capacité.

c. Le quartage

Le quartage est une technique d'échantillonnage visant à obtenir un échantillon représentatif d'un lot de minerai concassé. Il implique la division répétée du minerai en sous-échantillons plus petits jusqu'à l'obtention d'un échantillon final de taille adéquate pour

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

l'analyse. L'objectif est de réduire la variabilité naturelle du minerai et de garantir que l'échantillon final reflète fidèlement la composition du lot entier.

Après cette opération une quantité du minerai est mise de côté comme un témoin ensuite on applique une autre opération d'homogénéisation et quartage pour le reste du minerai qui est destiné aux étapes supérieures de traitement.



Figure II-5 : Opération de quartage.

➤ **Relation entre quartage et homogénéisation**

Bien que distincts, le quartage et l'homogénéisation sont liés dans la préparation mécanique du minerai de zinc.

- L'homogénéisation est une condition préalable au quartage efficace. Un minerai non homogénéisé peut présenter une ségrégation des particules, ce qui peut fausser l'échantillonnage lors du quartage.
- Le quartage permet d'évaluer l'efficacité de l'homogénéisation. En analysant l'échantillon final obtenu par quartage, on peut vérifier si l'homogénéisation a été réalisée de manière adéquate.

d. Broyage

On a broyé le minerai de zinc pour réduire la taille des particules de minerai et pour libérer les minéraux précieux et faciliter les étapes ultérieures de traitement, telles que la classification fine et la lixiviation. Un broyage efficace permet d'optimiser les performances des étapes ultérieures et d'améliorer la récupération du zinc.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

Une fois que le minerai est bien broyé en le faisant passer dans un tamis d'ouverture de 63 μm , la partie inférieure est récupérée est destinée à la lixiviation.

- **Type de broyeur utilisé**

- **Broyeur à disque**

Également connu sous le nom de broyeur à meules, le broyeur à disques est utilisé pour réduire la taille des particules de matériaux solides, tels que les minerais, les roches, les produits chimiques et les aliments. Il fonctionne selon le principe du broyage par cisaillement et compression entre les disques rotatifs.



Figure II-6 : Broyeur a disque.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

➤ **Caractéristiques techniques**

Diamètre des disques : Le diamètre des disques détermine la capacité de broyage du broyeur. Des disques plus grands peuvent traiter de plus gros volumes de matière.

Vitesse de rotation des disques : La vitesse de rotation des disques affecte la taille du produit final. Une vitesse de rotation plus élevée produit un broyage plus fin.

Écartement des disques : L'écartement entre les disques est le facteur principal qui détermine la taille du produit final. Un écartement plus petit produit un broyage plus fin.

Matériau des disques : Les disques peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux, tels que l'acier, la céramique ou la pierre. Le choix du matériau dépend de la dureté du matériau à broyer et des exigences de l'application.

Puissance du moteur : La puissance du moteur détermine la capacité de broyage du broyeur. Un moteur plus puissant permet de traiter des matériaux plus durs ou de broyer de plus gros volumes de matière.

e. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de minerai de zinc, ce fait pour déterminer la distribution des particules de minerai en fonction de leur taille. Cette information est essentielle pour optimiser les étapes ultérieures de traitement, telles que le broyage, la classification fine.

Méthode d'analyse granulométrique

➤ **Tamisage**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. 1 kg de minerai est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Cette procédure expérimentale peut se faire dans un environnement sec, opération la plus courante, ou humide, sous aspersion d'eau. Les grains retenus dans chaque tamis sont ensuite pesés afin de déterminer le pourcentage du poids original retenu dans chaque tamis et les résultats sont présentés dans un tableau.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels



Figure II-7 : Opération de tamisage.

- **Objectifs du tamisage de minerai de zinc**
- *Séparation granulométrique* : Classer le minerai concassé en fractions de tailles définies pour une alimentation appropriée aux étapes ultérieures de traitement, telles que le broyage, la classification fine et la flottaison.
- *Amélioration de l'efficacité du traitement* : Un tamisage efficace permet d'optimiser les performances des étapes ultérieures de traitement en fournissant une alimentation adéquate à chaque étape.
- *Contrôle de la qualité du produit* : Le tamisage permet de contrôler la granulométrie du produit final, répondant ainsi aux exigences spécifiques des utilisateurs finaux.

II.3 Méthodes d'analyses physico-chimiques

Les analyses au laboratoire ont été effectuées par fluorescence X, et par spectrométrie UV-visible. Nous donnerons une description succincte de ces méthodes et des équipements utilisés.

Les objectifs de ces méthodes sont :

- Identifier et caractériser les matériaux.
- Comprendre le comportement des matériaux.
- Contrôle et assurance qualité.
- Recherche et développement.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

II.3.1 Spectroscopie de fluorescence (FX)

La spectrométrie de fluorescence X (figure II) est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles.

L'échantillon est irradié avec des rayons X, ce qui entraîne l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.

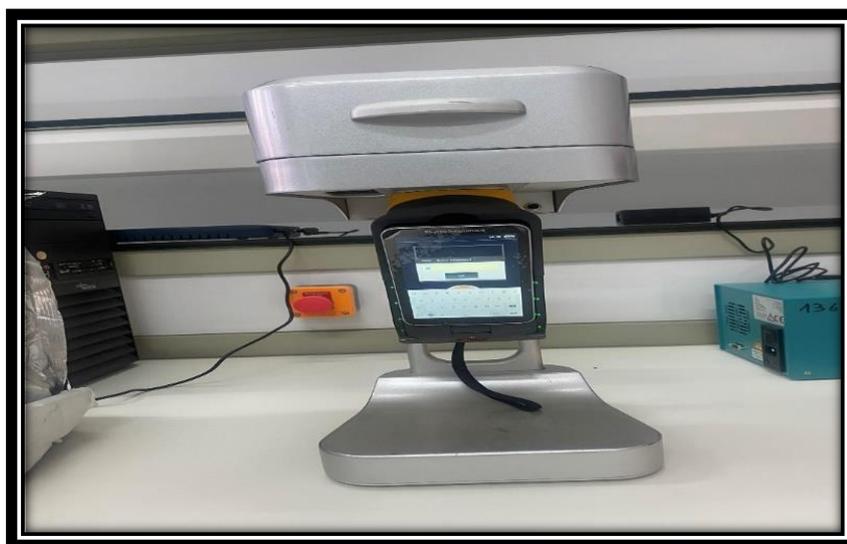


Figure II-8 : Photo de l'analyseur à fluorescence X.

- **Principe** : L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

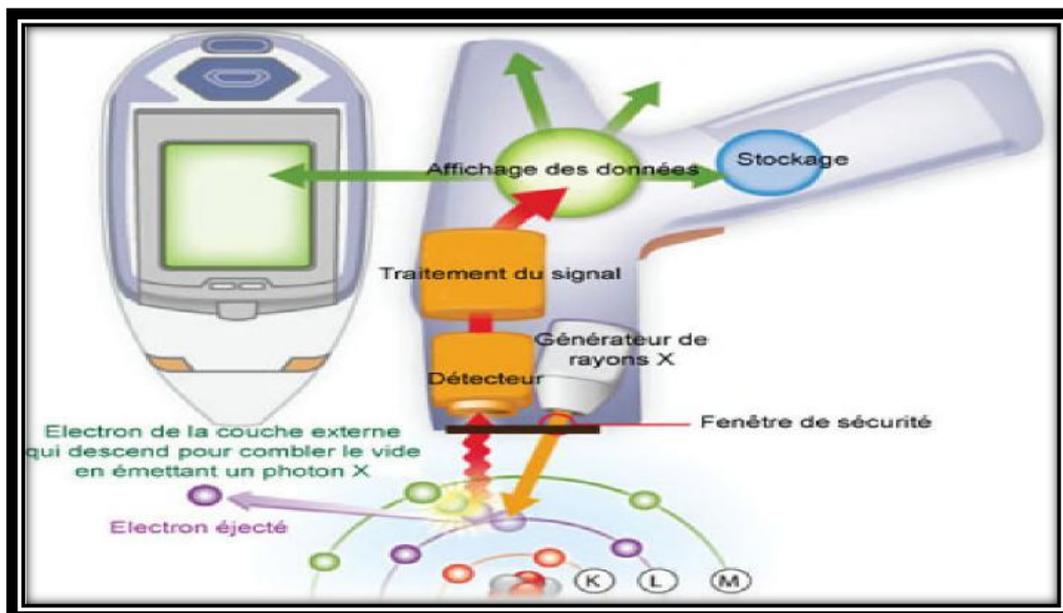


Figure II-9 : Principe des spectromètres portables par fluorescence X. [18]

- ❖ **Mode opératoire** : dans un porte échantillon en plastique, on étale 2 à 3 g de l'échantillon et on le place sur le porteur de l'appareil. Les résultats sont affichés sur l'écran d'un ordinateur.

II.3.2 Spectroscopie UV-visible

La spectroscopie UV-Visible est la plus ancienne et la plus utilisée des méthodes d'analyse dans les laboratoires. Elle permet notamment des applications quantitatives par application de la loi de Beer-Lambert. Cependant, elle ne fournit que peu d'informations structurales (Analyse qualitative) comparées aux autres méthodes spectroscopiques (IR, RMN et SM).

➤ **Principe**

Dans une molécule, les transitions électroniques UV-visibles mettent en jeu les énergies les plus importantes de la chimie (160 à 665 kJ·mol⁻¹). L'ordre de grandeur des énergies mises en jeu est celui des énergies de liaison des molécules et ces rayonnements peuvent parfois provoquer des ruptures de liaisons. Plus généralement, ils provoquent des transitions électroniques entre les différents niveaux d'énergie des molécules. L'absorption de photons se traduit par des transitions d'électrons engagés dans les orbitales moléculaires (les électrons des liaisons σ et π ainsi que les non liants n) de l'état fondamental et les niveaux non occupés des

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

états excités (σ^* et π^*). Chaque transition est caractérisé à la fois par sa longueur d'onde λ_{\max} et par son coefficient d'absorption molaire : ϵ_{\max} à cette longueur d'onde.

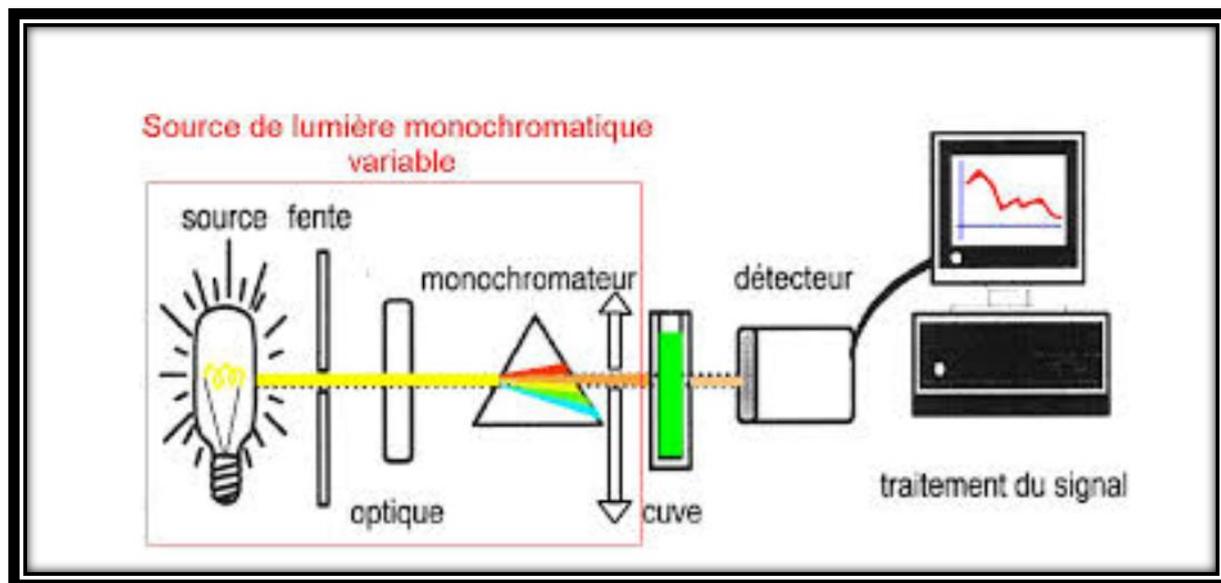


Figure II-10 : schéma simplifié le principe de l'UV-Visible.

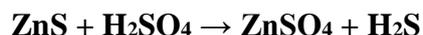
II.4 Techniques expérimentales

II.4.1 Lixiviation du minerai de zinc

a. Type de lixiviation appliquée

Lixiviation acide : dans ce procédé, l'acide utilisé est l'acide sulfurique (H_2SO_4), pour dissoudre le zinc du minerai. L'acide réagit avec les sulfures de zinc (ZnS) présents dans le minerai pour produire du sulfate de zinc (ZnSO_4) et le gaz sulfure d'hydrogène (H_2S).

L'équation chimique principale de la lixiviation acide du zinc est la suivante :



b. Facteurs influençant la lixiviation du minerai de zinc

b.1 Type de minerai : La composition minéralogique du minerai affecte généralement la méthode de lixiviation. Les minerais contenant principalement des sulfures de zinc sont généralement traités par lixiviation acide, tandis que les minerais oxydés ou carbonatés peuvent nécessiter une lixiviation ammoniacale.

b.2 Granulométrie du minerai : Une granulométrie plus fine du minerai favorise une meilleure dissolution du zinc et une lixiviation plus efficace.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

b.3 Conditions de lixiviation : La température, la concentration du réactif (acide ou ammoniac), le pH de la solution et le temps de réaction sont des paramètres importants qui influencent l'efficacité de la lixiviation.

c. Mode opératoire

c.1 Matériel utilisé :

- Acide sulfurique concentré (H_2SO_4) de qualité analytique.
- Eau distillée ou déminéralisée.
- Fioles jaugées de volumes appropriés (par exemple, 250 mL, 500 mL).
- Pipettes graduées ou burettes.
- Verres à bec.
- Agitateur magnétique ou barreau d'agitation.
- Lunettes de protection.
- Gants.
- Blouse de laboratoire.

c.2 Préparation des solutions

Trois solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) ont été préparées avec trois concentrations molaires :

$C1 = 0,5 \text{ mol/L}$, $V1 = 20 \text{ ml } (\text{H}_2\text{SO}_4) + 40 \text{ ml d'eau}$.

$C2 = 1,0 \text{ mol/L}$, $V2 = 40 \text{ ml } (\text{H}_2\text{SO}_4) + 20 \text{ ml d'eau}$.

$C3 = 1,5 \text{ mol/L}$, $V3 = 60 \text{ ml } (\text{H}_2\text{SO}_4)$.

❖ Opération:

- Rincer soigneusement la fiole jaugée avec de l'eau distillée.
- Porter les lunettes de protection et les gants.
- Pipeter le volume calculé d'acide sulfurique concentré dans la fiole jaugée.
- Ajouter de l'eau distillée dans la fiole jaugée en petites quantités, en agitant doucement après chaque ajout.
- Continuer à ajouter de l'eau distillée jusqu'à ce que le volume total atteigne le repère de graduation de la fiole.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

- Boucher la fiole et agiter vigoureusement pendant quelques minutes pour homogénéiser la solution.

Répéter cette opération pour préparer les solutions 2 et 3 et étiqueter soigneusement chaque fiole avec la concentration de l'acide sulfurique.



Figure II-11: Préparation des trois concentrations.

Une fois la préparation des concentrations terminée on ajoute une masse de 6g de minerai de zinc broyé à chaque concentration en respectant le rapport solide liquide : $(S:L) = (1:10)$.



Figure II-12: Solutions préparées.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

c.3 Agitation

La deuxième expérience consiste à l'agitation de chaque une des trois solutions préparées précédemment avec l'agitateur de laboratoire en respectant les paramètres suivants :

- Temps d'agitation = 120 minutes.
- Température = 85°C.
- Vitesses d'agitation = 500 tr/min.

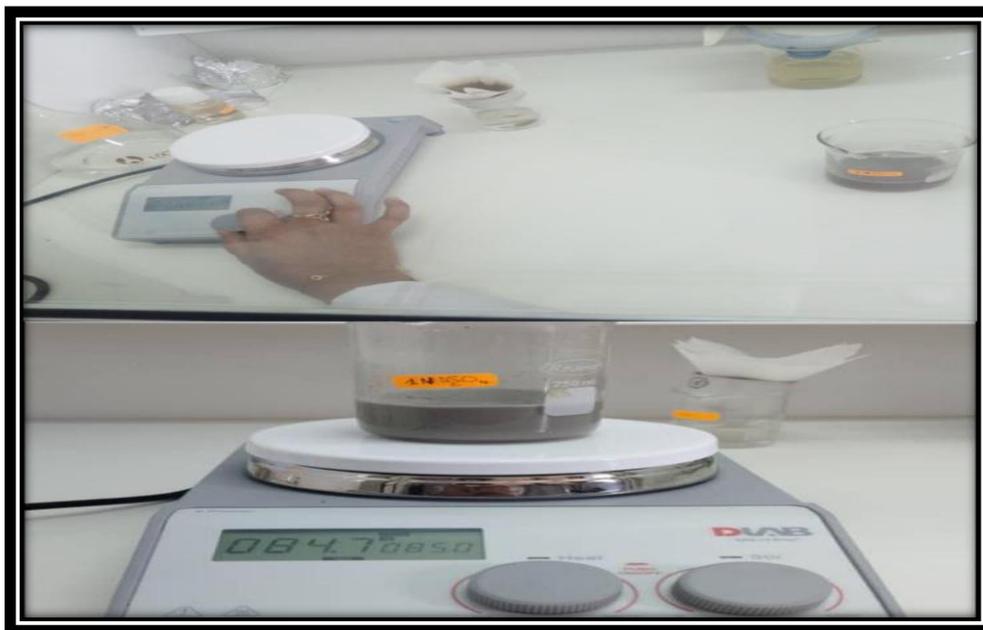


Figure II-13: L'opération d'agitation.

c.4 Filtration

Une fois l'agitation terminée, on procède à la filtration des solutions agitées pour la séparation de la phase liquide de la phase solide à l'aide d'un filtre en papier généralement

Utilisé pour la filtration de petites quantités de liquides. La fin de la filtration nous avons récupéré deux solutions contenant le concentré et le rejet de chaque solution.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

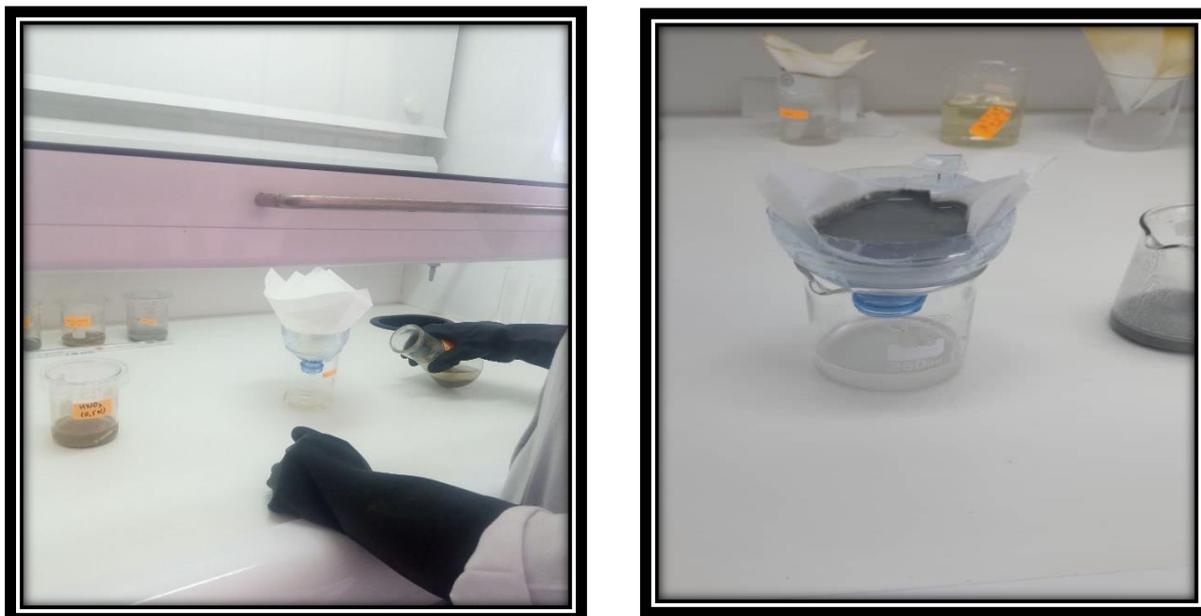


Figure II-14 : Filtration des solutions agitées.

A cette étape, nous avons caractérisé nos solutions par UV-visible. Cette technique utilise un spectrophotomètre pour mesurer l'absorbance de la lumière UV par la solution concentrée. L'absorbance est directement proportionnelle à la concentration des solutés absorbants d'UV, permettant une estimation rapide et précise de la concentration du produit.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels



Figure II-15 : Le suivi par ultraviolet (UV).

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

c.5 Récupération du rejet

L'objectif de notre expérience est la récupération du zinc des résidus de lixiviation, pour cela on a récupéré les rejets des trois solutions pour appliquer une deuxième lixiviation.

Donc les solutions des rejets récupérés sont mélangées pour former une seule solution cette dernière est destinée pour la deuxième lixiviation en passant par les étapes suivantes :

c.6 Séchage de rejet

En sèche le rejet de lixiviation par étuve pour éliminer l'eau et concentrer les métaux dissous. Ce processus implique l'évaporation de l'eau du lixiviat par chauffage dans une enceinte contrôlée, laissant derrière soi un concentré de métaux sous forme de solide ou de pâte.



Figure II-16: Etuve de laboratoire.

Le séchage a été effectué sous une température de 105°C pendant 04 heures. Le rejet obtenu sera analysé par FX.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels



Figure II-17: Rejet séché.

c.7 Deuxième lixiviation

Le rejet récupéré des trois solutions après l'avoir séchée et analysé par FX est destiné pour une autre lixiviation, alors on a préparé la concentration en ajustant le pH à 1.5 ensuite on a mélangé le rejet avec pour créer une solution à agiter sous les paramètres suivants :

- Temps d'agitation = 150 minutes.
- Température = 75°C.
- Vitesses d'agitation = 750 tr/min.

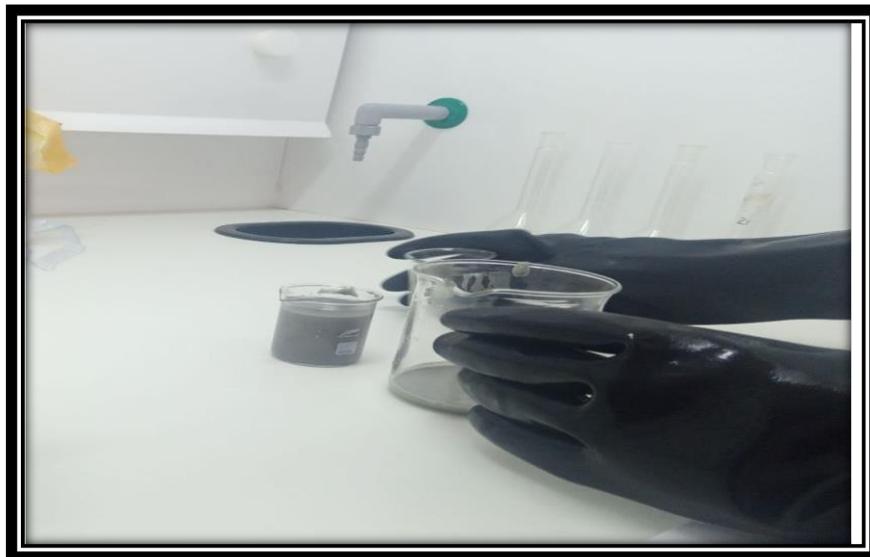


Figure II-18 : Préparation de la solution de rejet

Comme les expériences précédentes après l'agitation on applique une opération de filtration sur la solution agitée afin de séparer entre les deux phases solides et liquides. En suite on analyse la solution liquide par UV visible.

CHAPITRE II - Extraction du zinc méthodes et matériels

II.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposés les méthodes utilisées lors de la préparation de l'échantillon ainsi que les méthodes d'analyses et enfin les méthodes expérimentales pour la production du rejet à partir d'une double lixiviation du minerai brut.

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

Introduction

L'extraction du zinc se fait dans la plupart des cas par voie hydrométallurgique autrement dit par voie humide, qui se termine par une opération électrométallurgique de déposition en zinc cathodique. Une des difficultés pour l'industrie d'extraction est l'obtention d'un taux bas du zinc au cours de l'extraction. Ceci est généralement attribué à la présence du fer dans le concentré du zinc. La disposition du fer était une difficulté importante pour l'industrie pendant beaucoup de décennies et était directement responsable de bas rétablissements globaux de zinc. Le rétablissement du zinc de ses concentrés exige un rejet à la lixiviation d'un résidu de fer sous une forme qui réduit au minimum l'entraînement de zinc. Au cours de ce chapitre, nous allons exposer les résultats de la double lixiviation par attaque chimique (acide) et nous allons suivre le taux de l'extraction dans le résidu tout en interprétant ces résultats.

III.1 Résultats de l'analyse granulométrique

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous (tableau III.1) sont issus d'une analyse granulométrique dans le but de classer le minerai en différentes classes à l'aide d'une série de tamis de différentes ouvertures. Le poids des fractions retenues sur chaque tamis a été mesuré et exprimé en grammes (g) et en pourcentage (%) par rapport au poids total de l'échantillon.

Tableau III-1 : Résultats de l'analyse granulométrique du minerai de zinc brut.

Ouvertures des tamis (mm)	Poids des fractions (g)	Poids des fractions (%)	Refus cumulés (%)	Passants cumulés (%)
+4	296,7	29,67	0	100
-4 +2	280,6	28,06	29,67	70,33
-2 +1	127,6	12,76	57,73	42,27
-1 +0.5	68,4	6,84	70,49	29,51
-0.5 +0.25	55,6	5,56	77,33	22,67
-0.25 +0.125	51,9	5,19	82,89	17,11
-0.125 +0.1	23,9	2,39	88,08	11,92
-0.1 +0.08	32,9	3,29	90,47	9,53
-0.08 +0.063	23,9	2,39	93,76	6,24
-0.063 +0.045	31,7	3,17	96,15	3,85
-0.045	6,8	0,68	99,32	0,68
Total	1000	100	100	0

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

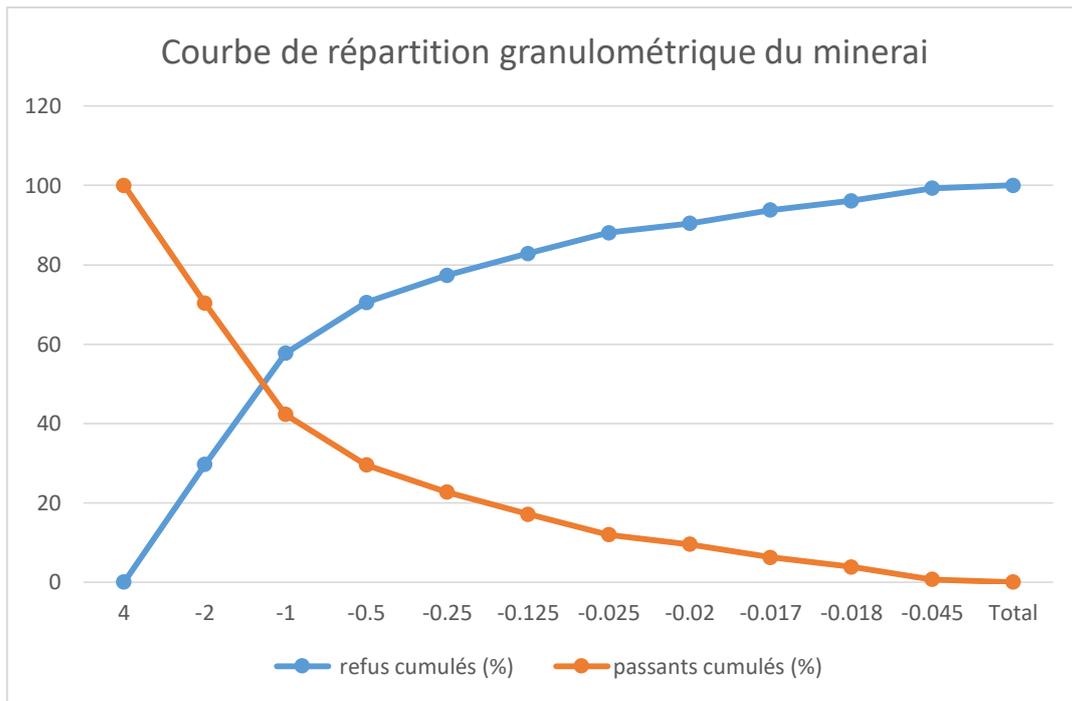


Figure III-1 : Courbe de répartition granulométrique du minerai.

Il ressort de ces résultats que l'échantillon de minerai de zinc est principalement composé de particules fines, avec plus de 80 % des particules ayant un diamètre inférieur à 0,25 mm. La fraction la plus importante (29,67%) a une taille comprise entre 4 et 2 mm.

La taille des particules du minerai est un facteur important qui affecte la récupération du métal lors du traitement. En général, des particules plus fines permettent une meilleure récupération du métal.

III.2 La composition chimique du minerai obtenue par FX

Une analyse des éléments composants notre minerai a été réalisée par spectrométrie FX au moyen d'un dispositif portable afin de préciser chimiquement leur composition et ainsi de mettre en lumière d'éventuelles variations chimiques qui existent entre les différents échantillons. Les résultats sont illustrés dans les tableaux ci-dessous :

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

a. Minerai brut

Tableau III-2 : Teneurs d'éléments dans le minerai brut.

Minerai brut	
Elément	Teneur (%)
Calcium	24,185
Soufre	5,975
Zinc	4,440
Fer	3,251
Aluminium	2,956
Magnesium	1,834
Silicium	0,780
Barium	0,214
Plomb	0,074
Manganese	0,063
Cadmium	0,050
Phosphore	0,026
Strontium	0,018
Tantalum	0,006
Molybdenum	0,006
Niobium	0,005
Argent	0,002
Antimonie	0,001

Les résultats obtenus par FX sont rassemblés dans le tableau (III.2), il ressort que l'échantillon est principalement composé de :

- Le minerai brut est riche en calcium, avec une teneur de 24,185 %.
- Le soufre est le deuxième élément le plus abondant, avec une teneur de 5,975 %.
- La teneur en zinc est de 4,440%.
- La présence du fer et d'aluminium ainsi le magnésium en quantité significatives.
- Les autres éléments sont présents en traces.

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

b. Classes granulométriques

Le tableau III.3 illustre les résultats FX de différentes classes granulométriques égale ou inférieure à 100 µm.

Tableau III-3 : La composition chimique du minerai (Analyse par FX).

Granulométrie						
Elements	+100	+80	+75	+63	+45	-45
CaO	31,623	28,717	33,136	31,871	31,937	28,359
SO ₃	15,044	15,280	12,123	15,800	17,747	19,323
FeO	4,828	4,909	3,966	5,535	6,339	7,796
Al ₂ O ₃	6,247	6,455	6,174	6,430	7,317	6,471
ZnO	4,324	4,096	3,960	4,340	4,465	4,774
SiO ₂	5,086	4,880	5,256	5,246	5,900	4,301
MgO	1,683	2,696	2,437	2,773	2,613	2,400
K ₂ O	0,432	0,864	0,397	0,327	1,143	0,864
Pb	0,071	0,078	0,040	0,097	0,098	0,156
P ₂ O ₅	0,084	0,127	0,050	0,091	0,116	0,130
Ba	0,114	0,060	0,109	0,098	0,110	0,123
Mn	0,054	0,050	0,062	0,052	0,052	0,052
Cd	0,036	0,030	0,030	0,032	0,036	0,015
SrO	0,011	0,012	0,012	0,012	0,009	0,005
Ta	0,005	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004
Nb	0,004	0,004	0,006	0,004	0,004	0,002
Ag	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Ni						0,001
Mo	0,010	0,002	0,013	0,009	0,006	
Sb	0,003		0,004	0,004		
TiO ₃		0,094				

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

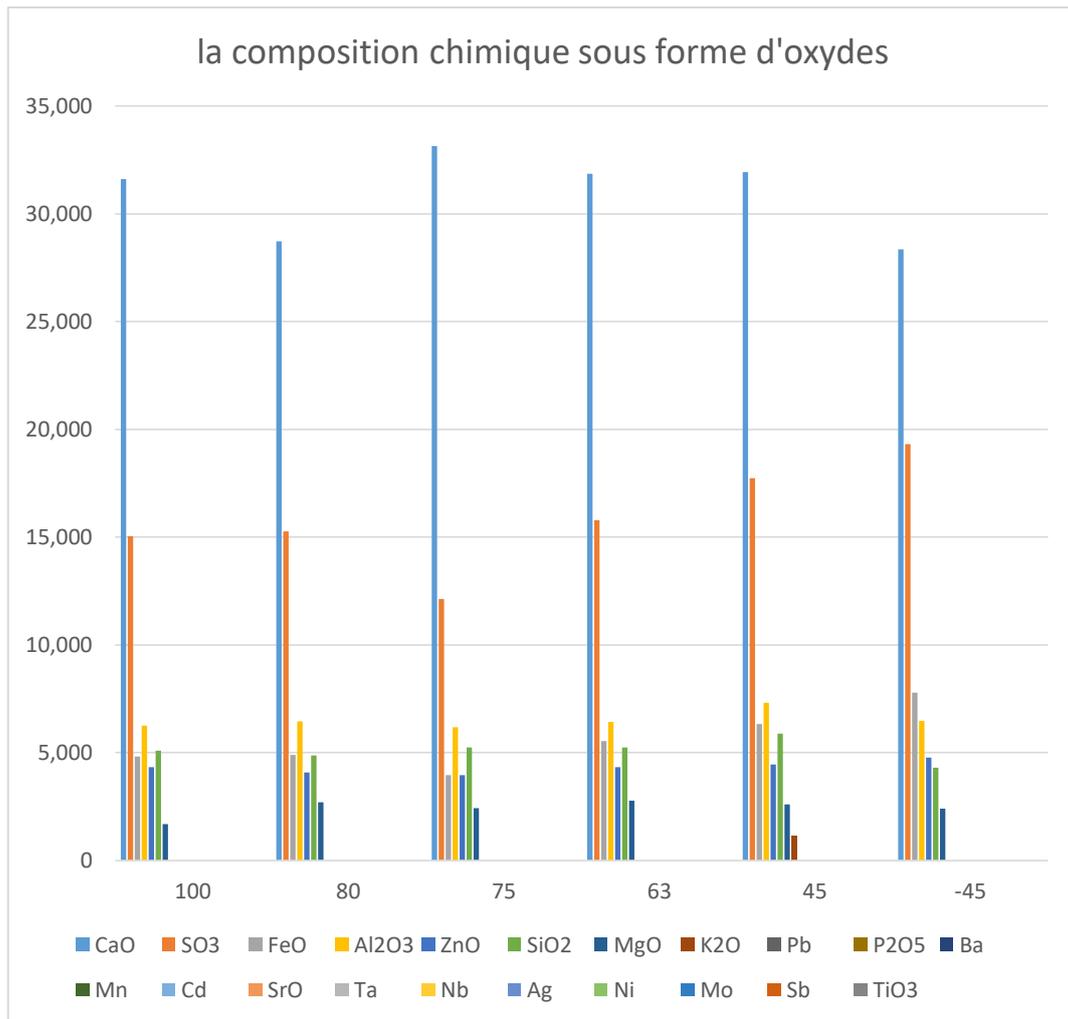


Figure III-2 : Histogramme de composition chimique des fractions granulométrique de minerai de zinc.

On remarque que la teneur de l'oxyde de zinc est importante dans les fractions inférieures à 63 µm, pour cette raison notre choix est porté sur cette fraction dans la suite du travail.

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

III.3 Résultats de la lixiviation acide

Effet de la concentration de l'acide : Pour savoir l'effet de la concentration sur le taux de lixiviation, nous avons enregistré trois spectres UV-Visible des concentrations de l'acide suivantes : 0,5 mol/L, 1 mol/L, et 1,5 mol/L. Les résultats sont illustrés dans la (figure III).

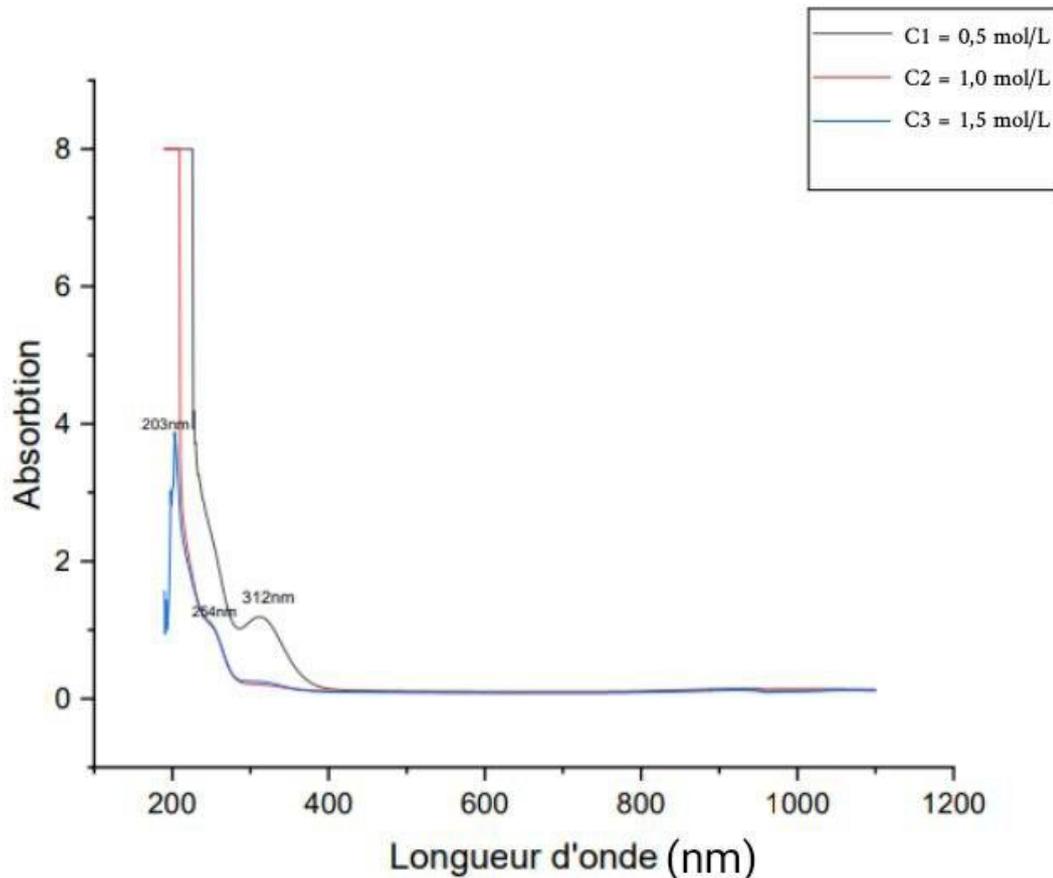


Figure III-3 : Spectre UV visible des 03 solutions.

La courbe d'absorption UV-visible présente trois pics d'absorption, à 203 nm et à 264 nm et le dernier à 312 nm. Ces pics d'absorption correspondent aux énergies nécessaires pour exciter les électrons de l'échantillon de son état fondamental vers un état excité. La hauteur des pics d'absorption est proportionnelle à la concentration de la substance dans l'échantillon.

Les bandes d'absorption trouvés sont caractéristiques aux ions de zinc L'absorption maximale est remarquée sur la courbe correspondante à la concentration molaire la plus élevée (1.5 mol/L).

Ceci indique qu'elle contient une concentration élevée des ions de zinc.

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

On peut conclure que l'augmentation de la concentration d'acide sulfurique de 0,5 à 1,5 mol/l augmente de manière significative le taux de dissolution l'extraction des ions de zinc est fiable avec l'acide sulfurique à une concentration de 1,5 mol/l.

III.4 Composition chimique du résidu issu de la première lixiviation

L'objectif de cette analyse est de quantifier les éléments qui se trouvent dans les résidus issus d'une lixiviation utilisant l'acide sulfurique de concentration 1,5 mol/L comme agent de lixiviation. La composition chimique du résidu est montrée dans le (tableau III.4) et la (figure III.4).

Tableau III-4 : Composition chimique du rejet issu de la première lixiviation.

Rejet de la première lixiviation	
Elément	Teneur (%)
Soufre	38,971
Calcium	15,185
Aluminium	3,087
Zinc	2,927
Magnesium	2,211
Fer	0,765
Silicium	0,161
Phosphore	0,138
Barium	0,079
Plomb	0,071
Cadmium	0,022
Strotium	0,015
Tantalum	0,004
Niobium	0,002
Antimonie	0.002
Argent	0,000

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

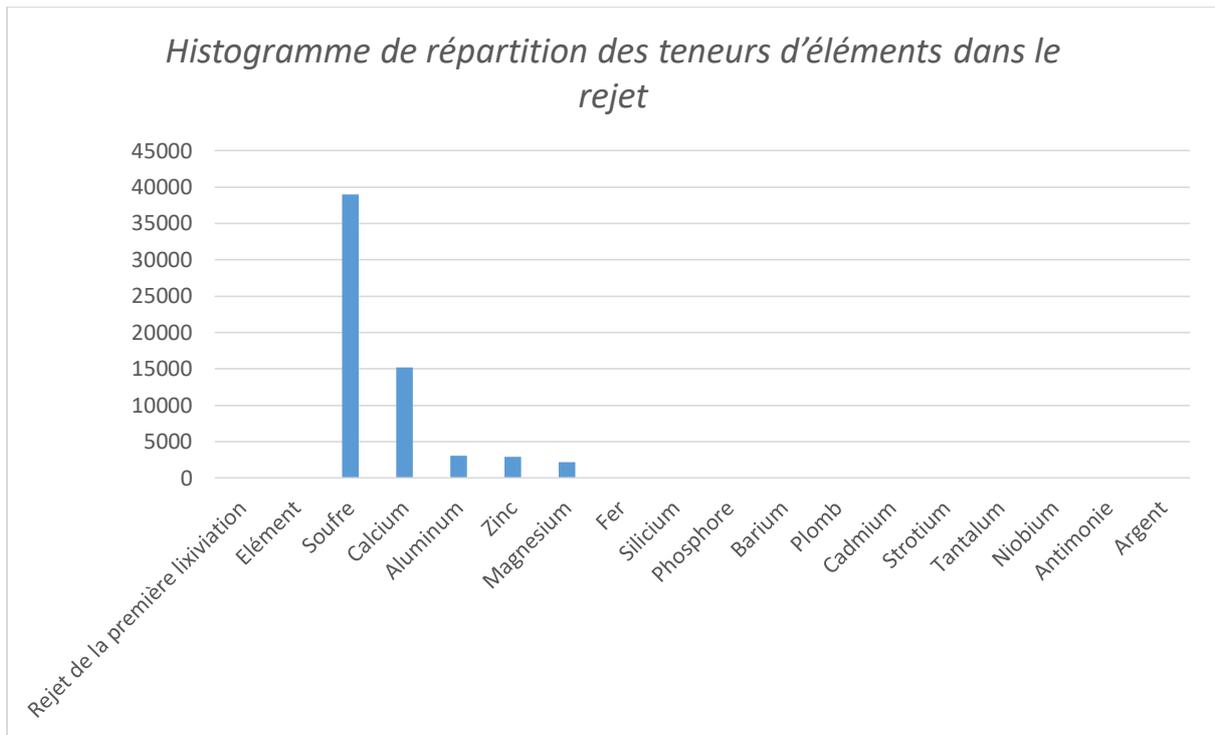


Figure III-4 : Histogramme de répartition des teneurs d'éléments dans le rejet.

L'analyse chimique (FX) de ce rejet montre que l'élément le plus abondant est le soufre (38,971%) ainsi que le calcium (15,185%), ça veut dire que ces éléments sont probablement présents dans l'échantillon sous forme de sulfates et de carbonate.

Le zinc se trouve dans le rejet avec une teneur de 2,927%. Une teneur plus faible que celle du minerai brut, cela signifie que lors de la lixiviation une partie du zinc a été lixiviée.

L'existence du zinc dans le résidu est dû à l'existence des ions Fe(II), l'extraction de ce dernier se fait simultanément avec le zinc et le cuivre avec l'ordre suivant :

Fe (II) > Cu (II) > Zn (II).

Il est à noter que l'extraction diminue avec l'augmentation du rayon ionique. Le fer (II) est le moins volumineux avec un rayon ionique 55pm étant le mieux extrait, vient le cuivre (II) et le zinc (II) avec des rayons ioniques successifs de 73pm et 74pm.

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

III.5 Composition chimique du résidu issu de la deuxième lixiviation

Le résidu issu de la première lixiviation a subi une deuxième lixiviation, la composition chimique du résidu issu de la deuxième lixiviation est illustrée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-5 : Teneurs d'éléments dans la deuxième lixiviation.

Rejet de la deuxième lixiviation	
Elément	Teneur (%)
Soufre	52,402
Calcium	18,589
Aluminium	3,994
Zinc	1,123
Magnesium	2,901
Fer	0,953
Silicium	0,645
Phosphore	0,216
Barium	0,116
Plomb	0,082
Cadmium	0,043
Strontium	0,022
Potassium	0,01
Molybden	0,005
Tantale	0,003
Niobium	0,002
Argent	0,001

Après la deuxième lixiviation, nous remarquons la présence du zinc en quantité inférieure à celle de la première lixiviation. L'existence du zinc à ce stade explique que l'extraction n'a pas atteint son maximum. Cela peut être attribué à plusieurs paramètres tels que la présence du fer dans les concentrés de zinc lorsque la blende est riche en fer, ce qui est souvent le cas il se forme des oxydes mixtes de zinc et de fer, ou bien la présence

CHAPITRE III RESULTATS ET L'INTERPRETATION

de ZnS insoluble. La diminution de la teneur en zinc est aussi observée par UV-Visible comme il est montré dans la figure suivante :

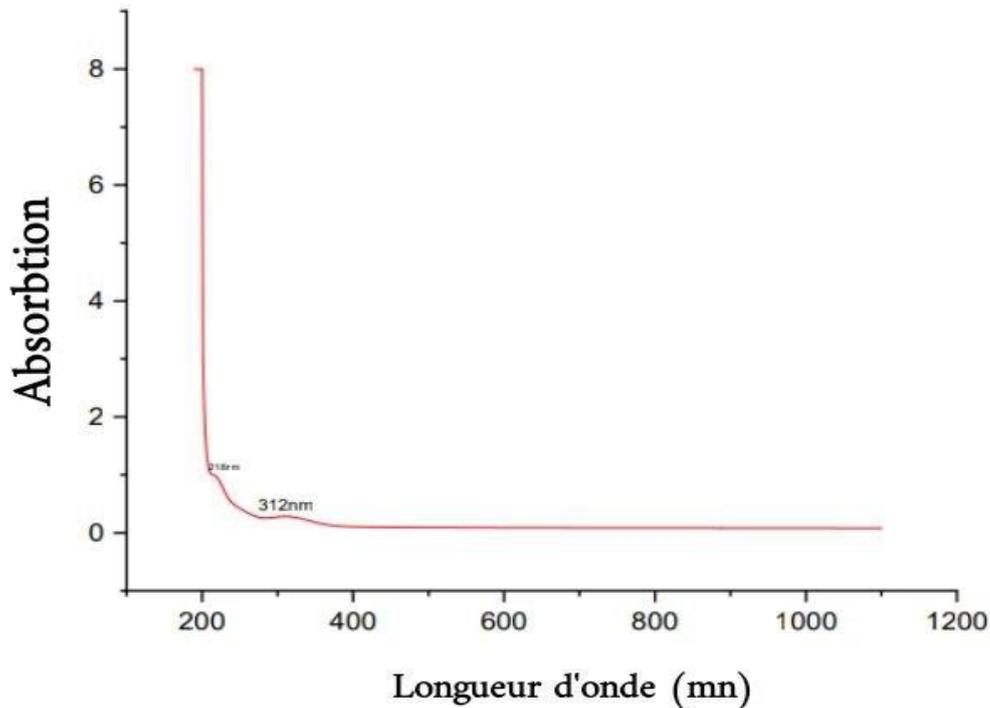


Figure III-5: Spectre UV visible du rejet issu d'une double lixiviation.

Le spectre présente un pic d'absorption principal à 312 nm. Ce pic est caractéristique des ions du zinc, L'allure de ce dernier indique une concentration faible de ces ions.

Conclusion

Le présent chapitre a englobé les résultats de la récupération au maximum de zinc contenu dans les résidus de lixiviation. Le résidu solide peut contenir, si le minerai de départ est riche en fer, une part importante du zinc initialement présent dans le minerai.

CONCLUSION GENERALE

La récupération du zinc à partir des résidus de lixiviation est un domaine de recherche important en raison de la valeur croissante du zinc et de la nécessité de réduire l'impact environnemental de l'industrie minière.

L'étude dans le cadre de ce sujet est de pouvoir récupérer par lixiviation acide un maximum de zinc contenu dans les résidus de lixiviation par suite d'une mise en solution réduite par la présence du fer. Le résidu solide peut contenir, si le minerai de départ est riche en fer, une part importante du zinc initialement présent dans le minerai.

La présente étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le taux de récupérations du zinc, lors de la dissolution des minerais de Chaâbat al Hamra pour une vitesse d'agitation (750 tr/m) avec un rapport solide-liquide (1:10) augmente avec l'augmentation de la concentration d'acide H₂SO₄, et la diminution de la taille des particules.
- L'existence du zinc dans le résidu issu d'une double lixiviation explique que l'extraction n'a pas atteint son maximum. Cela peut être attribué à plusieurs paramètres tels que la présence du fer dans les concentrés de zinc lorsque la blende est riche en fer, ce qui est souvent le cas il se forme des oxydes mixtes de zinc et de fer, ou bien la présence de ZnS insoluble.

Afin d'obtenir une meilleure extraction du zinc par voie humide, nous recommandons de prendre en considération plusieurs paramètres :

- La température de réaction.
- Le pH du milieu réactionnel.
- Le temps de la réaction.
- La méthode d'extraction comme le procédé de jarosite par exemple qui consiste à un traitement des solutions de lixiviation à base des sels alcalins tout en éliminant les ions ferriques par formation de complexe insoluble augmentant le rendement d'extraction du zinc qui peut aller jusqu'à 96% de zinc récupéré.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: "J. J. F. Geurts The environmental geochemistry of zinc (2010)".
- [2]: "Alloway B. J. (Heavy metals in soils, (ed.B. J.Alloway) 2eme édition, Blackie academic & professional 1995".
- [3]: "Marie-Pierre Isaure. Spéciation et transfert du zinc dans un dépôt de sédiment de curage contaminé : évolution le long du profil pédologique. Environmental Engineering. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2001. French. <tel-00717491>".
- [4]: "A.Daoud et L.Benomrane, « extraction par procédé hydrométallurgique du zinc et l'Argent continus dans le minerai d'ALABED » ", projet de fin d'étude, 1996".
- [5]: "Propriétés physico-chimiques du zinc et de ses alliages - Article publié dans la revue "Techniques de l'Ingénieur" (2018)".
- [6]: "Kiekens L. Zinc. In Heavy metals in soils (ed. B.J. Alloway), Blackie academic & professional 1995."
- [7]: "Kabata-Pendias A. et Pendias H. Trace éléments in soils and plants, CRC.1984".
- [8]: "ALZINC, documents technique, M.ZIANI, Formation sur site des techniciens en production Process de lixiviation, ALZINC 2004".
- [9]: "Bossuyt, E « new design for zinc refining columns », communication an annual meeting of AIME, New York, 3 mars 1971".
- [10]: "Arthur Lodin«Métallurgie de zinc » Vive C. Dunod 1905."
- [11]: "M. Bouabdallah, Étude géologique et métallogénique du gisement de zinc-plomb d'Amizour (Béjaïa)" (2012)".
- [12]: " S. Benhallou, Les gisements de zinc en Algérie : Géologie, minéralogie et géochimie" par (1988)".
- [13]: " D.R.V. Ramana et al, Zinc Extraction Technologies" (2013)".
- [14]: "Hydrométallurgie du zinc : Progrès récents et perspectives - Article publié dans la revue "Annales de Chimie - Science des Matériaux" (2013)".
- [15]: " A.R. Burkin, Traitement des mineraux de zinc" (2008)".
- [16]: "Michel Darcy : « Métallurgie du zinc », technique de l'ingénieur".
- [17]: "Jean Philibert, Alain Vignes, Yves Bréchet, Pierre Combrade, Métallurgie du minerai au matériau ,2002".
- [18]: "ESTEL CAMIZULI : Géo-archéologie et Patrimoine industrie, fluorescence X".

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[19]: "Tababouchet A., Conception d'une méthode d'exploitation avec remblayage hydraulique de la partie inférieure du gisement de zinc de Chaabet-El-Hamra (Ain-Azel Sétif). Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique - Alger, (2011). 111 p".

[20]: "Rezigat N., Imchal K., Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaâbat El-Hamra (Ain Azel, Wilaya de Sétif). Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Géologie. Université Ferhat Abbas - Sétif, (2008). 83 p".

[21]: "Benabbes L, Revalorisation et désulfuration environnementale des rejets de traitement du minerai de zinc : cas de la mine de Chaâbat-El-Hamra – Sétif (Algérie). Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en mines. Université Badji Mokhtar Annaba, (2018). 88 p".

RESUME

La production de zinc implique généralement l'extraction du minerai de zinc, son broyage et sa concentration, suivie d'une lixiviation pour dissoudre le zinc dans une solution aqueuse. La solution de lixiviat est ensuite soumise à un traitement ultérieur pour récupérer le zinc sous forme de métal pur. Cependant, ce processus génère des résidus de lixiviation importants, qui contiennent encore des quantités considérables de zinc. Ces résidus représentent un défi environnemental et une source potentielle de zinc précieuse.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la récupération du zinc des résidus issus de la double lixiviation du minerai brut de Chaâbat El Hamra avec l'acide sulfurique. La composition chimique d'une poudre fine (inférieure à 100 μ m) a révélé l'existence de : calcium, soufre, fer, zinc et autres minéraux. L'existence du fer et la présence du ZnS insoluble ont fait que la mise en solution pour l'extraction du zinc par lixiviation est réduite, ce qui a entraîné que les teneurs en zinc dans les résidus solides des rejets de lixiviation sont élevées même après la deuxième lixiviation. Ceci a été remarqué après les résultats de la FRX et le suivi par les spectres UV-Visible. La variation des paramètres tels que le pH, le temps de la mise en solution, la température et même la méthode d'extraction donneront des résultats meilleurs.

Mots clés : Zinc, Extraction, Résidus, Lixiviation, acide.

ABSTRACT

The production of zinc typically involves zinc ore extraction, crushing, and concentration, followed by leaching to dissolve zinc into an aqueous solution. The leachate solution then undergoes further processing to recover zinc in its pure metal form. However, this process generates significant leaching residues, which still contain substantial amounts of zinc. These residues pose an environmental challenge but also represent a potentially valuable source of zinc.

This study focuses on recovering zinc from residues resulting from double leaching of raw Chaâbat El Hamra ore with sulfuric acid. Chemical analysis of a fine powder (less than 100 μ m) revealed the presence of calcium, sulfur, iron, zinc, and other minerals. The presence of iron and insoluble ZnS reduces the solubility of zinc during leaching, resulting in high zinc concentrations in solid leaching residues even after the second leaching. This was observed following X-ray fluorescence (FRX) results and UV-Visible spectra analysis. Variations in parameters such as pH, leaching time, temperature, and extraction method are expected to yield improved results.

Keywords: Zinc, Extraction, Residues, Leaching, Acid.