



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie minier

Option : Valorisation des ressources minérales

Caractérisation et valorisation des rejets miniers cas de la mine de Kherzet Youcef (Sétif)

Par

BOUDABOUS Ichrak

BEKKAI Maroua

Devant le jury :

AMIRECH Abdelkrim	Président	M.C.B	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
AOUATI Mourad Salim	Encadreur	M.A.A	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
KRIM Mansour	Examineur	M.A.A	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026

Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le : 01/06/2026

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1. BOUDABOUS Ichrak
2. BEKKAI Maroua

Niveau : Master 2 Option : Valorisation des ressources minérales

Thème : caractérisation et valorisation des rejets miniers cas de la mine
kherezt youcef (sétif)

Nom et prénom de l'encadreur : AOUATI Mourad Salim

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1 : présentation du site	
Chapitre 2 : revue de littérature sur le Traitement des métaux	
Chapitre 3 : Caractérisation des résidus miniers sulfurés	
Chapitre 4 : Retraitement des résidus miniers	

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
و بتفويض منه
المختص برف الإقليم
محضر معاري

مجلس النواب
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

تحت الإخطار على إحصائية السيد (ة) :

2. جوان تلمذ

رئيس المجلس الشعبي البلدي

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي و تفويض منه المتصرف الإقليمي جعفر مغاري

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, qui nous a guidés, accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur **Aouati Mourad Salim**, pour son soutien continu, ses conseils précieux, ses orientations utiles tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour sa patience et ses encouragements qui ont été une véritable source de motivation.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants de l'Institut des Mines qui ont contribué à notre formation scientifique durant toutes nos années d'études, en nous transmettant leurs connaissances et leurs expériences.

Nous exprimons aussi notre gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de le juger.

Nous remercions chaleureusement tout le personnel et les cadres de la mine de Kherzet Youcef à Sétif pour leur accueil, leur coopération, ainsi que pour l'aide et les orientations qu'ils nous ont apportées durant la période de stage sur le terrain.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles et à nos amis, qui ont été un véritable soutien tout au long de ce parcours, en nous encourageant dans toutes les étapes.

Et nous remercions toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

À la lumière de ma vie et de ma raison d'être, à **ma mère** que j'aime plus que tout,

À l'homme à qui je dois ma réussite, **mon père**, que Dieu lui fasse miséricorde et l'accueille en Son vaste paradis,

À mes trois piliers de la vie : **Rachad, Adnane et Abdeljalil**, qui ont toujours été à mes côtés,

À ma camarade, mon binôme et mon amie **Ichrak**, qui a toujours été à mes côtés dans tous les domaines ; sans sa persévérance, son courage et son savoir-faire, ce travail n'aurait pas vu le jour,

À tous mes amis et mes proches, Je dédie ce travail.

Bekkai Maroua

Dédicace

Je dédie ce travail en premier lieu à mon cher père **Ahmed**, qui a été mon soutien à chaque étape, et dont l'encouragement et le soutien ont été essentiels pour atteindre ce niveau.

À ma **chère mère**, qui ne m'a jamais privé de son amour et de ses prières, et qui a toujours été une source de force et de patience pour moi.

À mes frères **Karim** et **Iyad**, qui ont été à mes côtés dans toutes les situations, partageant avec moi les moments de joie et de fatigue.

À mes sœurs **Ahlam** et **Anfal**, qui ont été pour moi un soutien et des compagnes de route, toujours présentes pour m'encourager.

À ma chère amie **Maroua**, que je considère comme une sœur et une collègue, et qui m'a accompagnée avec amour et sincérité tout au long de ce parcours.

Je n'oublie pas ma famille et tous mes amis, qui m'ont soutenue par un mot gentil, une prière ou un encouragement, et qui ont eu un grand impact sur mon succès.

À vous tous, je dédie ce travail avec beaucoup d'amour et de gratitude.

BOUDABOUS Ichrak

Résumé

Les déchets miniers constituent un sous-produit inévitable de l'exploitation minière ; ils contiennent des minéraux sulfurés tels que la pyrite, la sphalérite, la galène et la chalcopryrite, qui contribuent principalement au phénomène de drainage minier acide en raison de leur oxydation en présence d'eau et d'oxygène. Afin d'évaluer les propriétés physiques et chimiques de ces résidus, des échantillons ont été prélevés sur le site et soumis à une série d'analyses minéralogiques, chimiques et géochimiques. Les analyses par diffraction des rayons X ont confirmé la présence de proportions importantes de pyrite, ainsi que de minéraux secondaires tels que la sphalérite et la galène. Pour faire face au problème des eaux acides de mine et limiter les impacts environnementaux, les essais ont été orientés vers la désulfuration environnementale par flottation de la fraction riche en pyrite et la réduction de la fraction minérale pauvre en soufre contenant des métaux lourds tels que le zinc et le plomb. Les résultats ont démontré l'efficacité du procédé de flottation pour réduire la teneur en soufre et en métaux lourds dans les résidus finaux, tout en permettant la valorisation du zinc et du plomb récupérés. L'étude recommande également l'adoption de techniques de gestion environnementale appropriées, telles que l'enrobage des résidus riches en soufre avec des matériaux calcaires, afin de limiter l'acidification et de réduire les risques de pollution environnementale.

Mot clés: Rejets miniers, Minerais sulfurés, Drainage minier acide (DMA), Caractérisation, Désulfuration environnementale, Flottation, Gestion environnementale

Abstract

Mine waste is an inevitable by-product of mining operations; it contains sulphide minerals such as pyrite, sphalerite, galena and chalcopyrite, which are the main contributors to acid mine drainage as a result of oxidation in the presence of water and oxygen. To assess the physical and chemical properties of this waste, samples were taken from the site and subjected to a series of mineralogical, chemical and geochemical analyses. X-ray diffraction analyses confirmed the presence of significant proportions of pyrite, in addition to minor minerals such as sphalerite and galena. To address the issue of acid mine drainage and mitigate environmental impacts, tests were directed towards the environmentally sound removal of sulphur through the flotation of the pyrite-rich fraction and the reduction of the sulphur-poor mineral fraction containing heavy metals such as zinc and lead. The results demonstrated the effectiveness of the flotation process in reducing the sulphur and heavy metal content in the final tailings, whilst allowing for the recovery and utilisation of zinc and lead. The study also recommends the adoption of appropriate environmental management techniques, such as encapsulating sulphur-rich residues with calcareous materials, to limit acidification and reduce the risk of environmental pollution.

Keywords: Mining waste, Sulfide ores, Acid Mine Drainage (AMD), Characterization, Environmental desulfurization, Flotation, Environmental management

ملخص

تعتبر النفايات المنجمية ناتجًا حتميًا لعمليات استغلال المناجم، حيث تحتوي على معادن كبريتيدية مثل البيريت، السفاليريت، الغالينا والكالكوبيريت، والتي تساهم بشكل رئيسي في ظاهرة التصريف المنجمي الحمضي نتيجة تعرضها للأكسدة بوجود الماء والأكسجين. ومن أجل تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المخلفات، تم أخذ عينات من الموقع وإخضاعها لسلسلة من التحاليل المعدنية والكيميائية والجيوكيميائية، حيث أكدت تحاليل حيود الأشعة السينية وجود نسب معتبرة من البيريت، إضافة إلى معادن ثانوية مثل السفاليريت والغالينا. ولمواجهة مشكلة التصريف المنجمي الحمضي والحد من التأثيرات البيئية، تم توجيه الاختبارات نحو إزالة الكبريت بيئيًا عن طريق تعويم الجزء الغني بالبيريت وتقليل الجزء المعدني الفقير بالكبريت المحتوي على المعادن الثقيلة كالزنك والرصاص. وقد أظهرت النتائج فعالية عملية التعويم في تقليل محتوى الكبريت والمعادن الثقيلة داخل المخلفات النهائية، مع إمكانية تثمين الزنك والرصاص المسترجعين. كما توصي الدراسة باعتماد تقنيات تسبير بيئي مناسبة، مثل تغليف المخلفات الغنية بالكبريت بمواد كلسية، للحد من تكون الحموضة وتقليل مخاطر التلوث البيئي.

الكلمات المفتاحية: التفريغ المنجمي، خامات الكبريتيد، التصريف المنجمي الحمضي، التوصيف، التخلص من الكبريت البيئي، التعويم، التسبير البيئي

Unité Signification

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

g/t : Gramme par tonne

kg/m³ : Kilogramme par mètre cube

m : Mètre

m³: Mètre cube

mm : Millimètre

mg/L : Milligramme par litre

ppm : Parties par million

µm : Micromètre

Abréviations et sigles utilisés

DMA : Drainage minier acide

DRX : Diffraction des rayons X

EH : Potentiel d'oxydoréduction

ETM : Eléments de traces métalliques

IANOR: Institut Algérien de Normalisation

ICP : plasma à couplage inductif

ISO: International Organization for Standardization

LOI : Loss On Ignition (Perte au feu)

MEB : Microscopie Electronique A Balayage

MLA : Minéral Libration Analyses

PA : Potentiel De Génération D'acide

PH: potentiel d'hydrogène

PN : potentiel de neutralisation

PNN : potentiel net de neutralisation

SAA: Spectrométrie d’Absorption Atomique

TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure

XRF : fluorescence des rayons X

SOMMAIRE

Titre	Page
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Présentation du site	
I.1 Introduction	3
I.2 Situation géographique	3
I.3 Situation géologique	4
I.3.1 Géologie Régionale de Kherzet Youcef	4
I.3.2 Géologie locale du gisement de Kherzet Youcef	5
I.3.3 Minéralogie du gisement de kherezt Youcef	7
I.4 Hydrologie et Hydrogéologie de Kherzet Youcef	9
I.5 Géologie régionale de Châabet-El-Hamra	10
I.5.1 Géologie locale de Châabet El-Hamra.	11
I.5.2 La minéralisation de Châabet El-Hamra	12
I.5.3 Hydrogéologie de Châabet El-Hamra	12
I.6 Réserves géologiques	13
I.7 Exploitation	14
I.7.1 Méthodes d'exploitation	14
I.7.1.1 Choix de la méthode d'exploitation	14
I.8 Technologie de traitement du minerai	15
I.8.1 Traitement mécanique	16
I.8.1.1 Section de concassage et de criblage	16
I.8.1.2 Section de broyage et classification	18
I.8.2 Enrichissement	21
I.8.2.1 Flottation et filtration	21
I.8.2.2 Circuit de flottation	22
I.8.2.3 Flottation Dégrossissage	22
I.9 Conclusion	26
Chapitre II : Revue de littérature sur le Traitement des métaux lourds	
II.1 Introduction	27
II.2 Les métaux de base : propriétés et utilisation du zinc, plomb et cuivre	27
II.2.1 Le zinc	28

II.2.1.1 Caractérisation physico-chimique du zinc	29
II.2.1.2 Utilisations et applications du zinc	29
II.2.1.3 Toxicité du zinc	30
II.2.2 Le plomb	31
II.2.2.1 Caractérisation physico-chimique du plomb	32
II.2.2.2 Utilisations et applications du plomb	32
II.2.2.3 Toxicité du plomb	33
II.2.3 La pyrite	33
II.2.3.1 Caractérisation physico-chimique de pyrite	34
II.2.3.2 Utilisations et applications de pyrite	34
II.2.3.3 Réaction d'oxydation de la pyrite	35
II.2.3.4 Processus d'oxydation des sulfures et effets sur la flottation	36
II.2.4 Le cuivre	37
II.2.4.1 Propriétés du cuivre	38
II.2.4.2 Les types de minerai de cuivre	39
II.2.4.2.1. Sulfures	39
II.2.4.3 Utilisations du cuivre	40
II.2.4.4 Impact de cuivre sur la santé et l'environnement	41
II.3 traitement par flottation des sulfures	42
II.3.1 Réactifs de flottation des sulfures	43
II.4 Machines de flottation	47
II.4.1 Colonne de Flottation	47
II.4.2 Cellule de flottation	48
II.5 Lixiviation chimique et bactérienne des sulfures et techniques d'extraction par solvant	49
II.5.1 Généralités sur la lixiviation	49
II.5.2 Types de lixiviation	49
II.5.2.1 Lixiviation chimique	49
II.5.2.2 Lixiviation bactérienne	51
II.5.2.2.1 Mécanismes de la lixiviation bactérienne	52
II.5.3 Extraction liquide-liquide	53
II.5.3.1 Extraction par solvant du zinc	54
II.6 Effluent	55

II.6.1 Définition	55
II.6.2 Les différents types d'effluents	55
II.7 Définition d'un toxique	56
II.7.1 Les forme d'intoxication	56
II.7.2 Comment évaluer un effet toxique	57
II.7.3 L'effets des activités minières sur les eaux	58
II.8 Conclusion	59
Chapitre III : Caractérisation des résidus miniers de Châabet El Hamra	
III.1 Introduction	60
III.2 Pratiques de référence Sur La Caractérisation Des Résidus Miniers	60
III.3 Méthodologie De Caractérisation	61
III.3.1 Stratégie D'échantillonnage Sur Site	61
III.3.1.1 Un Echantillonnage De Surface	61
III.3.1.2 Un Echantillonnage En Profondeur	61
III.3.1.3 Un Echantillonnage Des Eaux Et Des Sols Environnants	61
III.3.2 Préparation Des Echantillons Pour Analyses	61
III.3.2.1 Séchage	62
III.3.2.2 Homogénéisation Et Quartage	62
III.3.2.3 Broyage Et Pulvérisation	62
III.3.2.4 Quartage	62
III.3.2.5 Séparation Granulométrique	63
III.3.3 Caractérisation Physique Et Minéralogique	63
III.3.3.1 Analyse Granulométrique	63
III.3.3.2 Détermination De La Densité Réelle	63
III.3.3.3 Diffraction Des Rayons X (DRX)	64
III.3.3.4 Analyse D'image Automatisée (Mineral Liberation Analysis – MLA)	65
III.3.3.5 Microscopie Electronique A Balayage (MEB-EDS).	65
III.3.4 Caractérisation Chimique	66
III.3.4.1 Analyse Chimique Totale	66
III.3.4.2 Fluorescence X (XRF)	67
III.3.4.3 ICP-OES Et ICP-MS	67
III.3.4.4 Analyse Du Soufre Et Du Carbone	67

III.3.5 Caractérisation Environnementale Et Géochimique	68
III.3.5.1 Essais Statiques De Prédiction Du Drainage Minier Acide	68
III.3.5.2 Potentiel Net De Neutralisation (PNN)	69
III.3.5.3 Potentiel De Neutralisation (PN)	69
III.3.5.4 Potentiel De Génération D'acide (PA)	70
III.3.5.5 Mesure Du PH De Pâte	70
III.4 Résultats et interprétation sur La Caractérisation	71
III.4.1 Caractéristiques Physiques Et Granulométriques	71
III.4.2 Densité et masse volumique	72
III.4.3 Composition Minéralogique	72
III.4.4 Composition Chimique Élémentaire	74
III.4.5 Résultats Fluorescence X (XRF) et ICP-OES	76
III.5 Caractérisation Environnementale Et Géochimique	77
III.5.1 PH De Pâte Et Acidité Actuelle	77
III.5.2 Potentiel De Génération D'acide Et De Neutralisation (Essais Statiques)	83
III.5.3 Résultats des essais cinétiques	84
III.6 Impact Sur Les Eaux Et Les Sols Environnants	84
III.6.1 Impacts sur l'eau	84
III.6.2 Impact sur le sol	85
III.6.3 Impact sur les cultures et forêts	85
III.6.4 Impact sur le milieu naturel	85
III.6.5 Impact sur le paysage	86
III.6.6 Impact lie aux bruits	86
III.6.7 Impact lies aux vibrations	86
III.6.8 Impact lies aux poussières	86
III.7 Limites De L'étude De Caractérisation	87
III.8 conclusion	87
Chapitre IV : Retraitement des résidus miniers	
IV.1 Introduction et objectif de valorisation	88
IV.2 Etat de l'art sur les résidus miniers sulfurés	88
IV.3 Méthodes de valorisation applicable aux résidus	89
IV.3.1 Flottation	89

SOMMAIRE

IV.3.2 Lixiviation	89
IV.3.3 Séparation gravimétrique	90
IV.3.4 Séparation magnétique	90
IV.3.5 Combinaison entre les méthodes de valorisation applicable aux résidus	90
IV.4 Travaux antérieurs sur les résidus miniers de Châabet-El-Hamra	91
IV.5 Méthodologie d'essai de valorisation	92
IV.5.1 Préparation de l'échantillon	92
IV.5.2 Essais de flottation	92
IV.5.3 Essais de désulfuration	94
IV.5.4 Essais de la Lixiviation	94
IV.5.5 Essais de la séparation gravimétrique	94
IV.6 Résultats d'essais de valorisation	94
IV.6.1 Résultats des essais de flottation du zinc	94
IV.6.2 Résultat d'essai de flottation sélective plomb zinc	95
IV.6.3 Optimisation des paramétré de flottation	95
IV.6.4 Résultat d'essais de désulfuration	97
IV.6.5 Résultat d'essais Lixiviation	98
IV.6.6 Résultat d'essais de la séparation gravimétrique	99
IV.7 Evaluation environnemental après traitement	99
IV.8 Schéma intégré de retraitement et de valorisation des résidus miniers	101
IV.9 Drainage minier acide DMA	104
IV.9.1 Réactions chimiques du DMA	105
IV.9.2 Méthodes de traitement de DMA	105
IV.10 Stratégie Réhabilitation du site	106
IV.10.1 Recouvrement des résidus	107
IV.10.2 Neutralisation chimique	107
IV.10.3 Revégétalisation	107
IV.10.4 Gestion des eaux de drainage	108
IV.10.5 Valorisation des résidus miniers	108
IV.10.6 Evaluation de cadre législatif et réglementaire algérien	109
IV.11 Conclusion	110
CONCLUSION GENERALE	111

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I	
Tableau I.1 : Tableau de minéralisation des mines Kherzet Youcef et Châabet-El-Hamra	8
Tableau I.2 : Nature de la minéralisation du gisement de Kherzet Youcef (EREM, 1992).	9
Chapitre II	
Tableau II.1 : Tableau Caractérisation physico-chimique du zinc	29
Tableau II.2 : Tableau Caractérisation physico-chimiques du plomb	32
Tableau II.3 : Tableau Caractérisation physico-chimique de pyrite	34
Tableau II.4 : Tableau Propriétés physique du cuivre	38
Tableau II.5 : Tableau Propriétés chimique du cuivre	38
Tableau II.6 : Les principaux minéraux pouvant être séparés par flottation	43
Tableau II.7 : Principaux collecteurs des minéraux sulfurés (R = radical aliphatique)	44
Tableau II.8 : Les formes d'intoxication	58
Chapitre III	
Tableau III.1 : Composition minéralogique de la digue de Châabet-El-Hamra (Sétif)	65
Tableau III.2 : Résultat de séparation granulométrique des rejets de traitement de minerai Zinc.	71
Tableau III.3: Propriétés physiques des résidus	72
Tableau III.4 : Composition minéralogique des classes granulométriques de la digue de Chaâbet-El-Hamra (Sétif)	73
Tableau III.5: Phases minérales identifiées et quantifiées par DRX (Rietveld)	74
Tableau III.6 : Analyses chimiques des rejets miniers de Châabet-El-Hamra de la fraction	75
Tableau III.7 : Exigences au point de rejet de l'effluent final	75
Tableau III.8 : Composition chimique en éléments majeurs (% massique)	76
Tableau III.9: Teneurs en métaux et métalloïdes (ppm ou % selon les éléments)	77
Tableau III.10: Synthèse des réactions chimiques sur la surface de la pyrite	79
Tableau III.11 : Réactions considérées pour la détermination de pH optimal de la pyrite.	80
Tableau III.12 : Classification du rapport PN/PA	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.13 : Résultats typiques de l'essai ABA sur les résidus de Châabet-El-Hamra	83
Chapitre IV	
Tableau IV.1 : Réactifs de flottation	93
Tableau IV.2 : Résultat d'essai de flottation sélective plomb zinc	95
Tableau IV.3: Résultats de lixiviation et comparaison aux seuils réglementaires	98
Tableau IV.4 : Résultat d'essai de la séparation gravimétrique	99
Tableau IV.5 : Evaluation environnemental après traitement	100
Tableau IV.6 : Résumé comparatif des méthodes	100
Tableau IV.7 : retraitement et valorisation des résidus miniers	102

LISTE DES FIGURES

Chapitre I	
Figure I.1 : Situation géographique du gisement de Châabet-El-Hamra.	4
Figure I.2 : Carte géologique de la région Ain Azal	5
Figure I.3 : Zones susceptibles d'être affectées par la présence de polluants métalliques sur le site de Kherzet Youcef.	6
Figure I.4 : Coupe hydrogéologique schématique de la région de Kherzet Youcef	10
Figure I.5 : Colonne stratigraphique du gisement Châabet-El-Hamra	11
Figure I.6 : Carte géologique des environs de la mine de Châabet-El-Hamra (D'après Carte géologique au 1/50.000 d'Ain Azel,	12
Figure I.7 : Coupe hydrogéologique Profil 0– Profil 30 (D'après ENOF 2003)	13
Figure I.8 : Distribution des teneurs en Zn des corps minéralisées de Chaâbet E1-Hamra (D'après le bureau d'étude canadien SIDAM)	14
Figure I.9 : Vue de la section de concassage et criblage de l'usine de Kherzet Youcef	17
Figure I.10 : Vue de la section concassage à mâchoire, usine de Kherzet Youcef	17
Figure I.11 : Vue de crible vibrant	18
Figure I.12 : Vue de concasseur à cône	18
Figure I.13 : Vue de broyeur à boulet	19
Figure I.14 : Vue de Classificateur à vis	20
Figure I.15 : Schéma technologique de préparation mécanique pour kherzet youcef	20
Figure I.16 : Cellule de flottation type Denver.2026	22
Figure I.17 : Filtration de concentré de flottation de blende Zn.	23
Figure I.18 : Schéma de traitement par flottation d'un minerai de zinc de kherezit youcef	24
Figure I.19 : Diagramme de La chaîne technologique du traitement du minerai de Chaabet-El-Hamra	25
Chapitre II	
Figure II.1 : Le zinc	28
Figure II.2 : Le plomb	31
Figure II.3 : La pyrite	34
Figure II.4 : La chalcopryrite.	39
Figure II.5 : La Bornite.	39

LISTE DES FIGURES

Figure II.6 : La covelline.	39
Figure II.7 : La chalcocite.	40
Figures II.8 : Schéma d'une colonne de flottation	48
Figures II.9 : Cellule de flottation Denver Sala type DR ouvert	49
Figure II.10 : Équilibre de partage d'un soluté A entre deux phases liquides non-miscibles (aqueuse et organique)	54
Figure II.11 : Les différents types d'étude	58
Chapitre III	
Figure III.1 : Courbe de la séparation granulométriques des rejets miniers sulfurés de Châabet-El-Hamra	71
Figure III.2 : Composition minéralogique des rejets miniers de la fraction inférieur 0,45mm.	72
Figure III.3 : Diffractogramme typique des résidus de Châabet-El-Hamra (schématique)	73
Figure III.4 : Influence des valeurs de PH et Eh sur l'état de surface de la pyrite	80
Figure III.5 : influence du PH sur la concentration des ions $[\text{OH}^-]$, Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$	81
Figure III.6 : influence du PH sur la concentration des ions $[\text{OH}^-]$, HCO_3^- , CO_3^{2-} , Fe^{2+}	82
Figure III.7 : influence du PH sur la concentration des ions $[\text{OH}^-]$, Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^-$	82
Chapitre IV	
Figure IV.1 : Combinaison entre les Méthodes de valorisation applicable aux résidus	91
Figure IV.2 : Protocole des essais de valorisation des résidus	93
Figure IV.3: Schéma de procédé par flottation différentielle	96
Figure IV.4: Diagramme de traitement et de gestion des rejets miniers sulfurés	97
Figure IV.5: Schéma de procédé par voie hydrométallurgies	99
Figure IV.6: Schéma intégré de retraitement et de valorisation des résidus miniers	101
Figure IV.7 : Effet du drainage minier acide	105
Figure IV.8 : Recouvrement des résidus miniers par une couverture étanche limitant l'infiltration de l'eau et la diffusion de l'oxygène	107
Figure IV.9 : Revégétalisation des résidus miniers pour assurer la stabilité des sols et	108

LISTE DES FIGURES

réduire l'érosion.	
Figure IV.10 : Système de collecte et de traitement des eaux de drainage contaminées.	108
Figure IV.11 : Schéma global de réhabilitation	109

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie minière constitue l'un des piliers fondamentaux du développement économique de nombreux pays, notamment en Algérie, où l'exploitation des ressources minérales a joué un rôle historique. [1]

Cependant, cette activité génère inévitablement des quantités massives de résidus miniers, communément appelés "rejets" ou "stériles", qui s'accumulent au fil des décennies sur les sites d'exploitation. Ces résidus représentent à la fois un défi environnemental majeur et une opportunité économique souvent sous-estimée. [2]

Le site minier de Châabet-El-Hamra, situé dans la région nord-est de l'Algérie, fait partie de ces gisements qui ont été exploités pour l'extraction de minerais métalliques, principalement le zinc et le plomb, associés à une gangue composée de divers minéraux silicatés et carbonatés. Au cours des différentes périodes d'exploitation, les techniques d'extraction et de traitement utilisées n'ont pas toujours permis une récupération optimale des éléments valorisables. [3] En conséquence, les résidus accumulés sur ce site contiennent encore des teneurs significatives en métaux et en minéraux d'intérêt, qui méritent d'être réévalués à la lumière des avancées technologiques actuelles. [4]

La problématique liée aux résidus miniers de Châabet-El-Hamra est double. D'une part, ces résidus constituent une source potentielle de contamination des eaux souterraines, des sols et de l'atmosphère environnante, en raison de la présence de métaux lourds et de minéraux sulfurés susceptibles de générer des drainages miniers acides. [5]

D'autre part, la raréfaction progressive des ressources minérales primaires à l'échelle mondiale et la hausse des coûts d'exploration rendent de plus en plus pertinente la revalorisation de ces "déchets" qui, dans bien des cas, présentent des teneurs comparables à celles de gisements primaires actuellement exploités dans d'autres régions du monde. [6]

Dans ce contexte, la caractérisation approfondie et la valorisation des résidus miniers s'inscrivent pleinement dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable. La caractérisation constitue l'étape préalable et indispensable à toute tentative de valorisation : elle permet de connaître précisément la composition chimique, la minéralogie, la granulométrie et les propriétés physiques des résidus, afin de choisir les procédés de traitement les plus adaptés. [7] La valorisation, quant à elle, vise à transformer ces résidus en

ressources utiles, que ce soit par la récupération des métaux résiduels, la fabrication de matériaux de construction, ou d'autres applications industrielles. [8]

Le présent travail s'articule autour de quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à la présentation du site géographiquement ,géologiquement, méthode d'exploitation et de traitement du minerais ,le second chapitre c'est la revue de littérature sur les métaux lourds (caractéristiques ,utilisations ,et différents procédés de traitement des sulfures) .le troisième chapitre la caractérisation détaillée des résidus miniers de Châabet-El-Hamra, en mobilisant un ensemble de techniques analytiques complémentaires qui permettent d'établir un portrait complet de ces matériaux. Le quatrième chapitre aborde les différentes voies de valorisation envisageables, en examinant les procédés physiques, chimiques et biologiques applicables, ainsi que les résultats obtenus et les perspectives d'optimisation.

Chapitre I :

présentation du site

I.1 Introduction

Les gisements polymétalliques en plomb-zinc représentent un type important parmi les principaux gisements miniers algériens. La région d'Ain Azel, dans la wilaya de Sétif, est célèbre pour la présence de ce type de gisements, notamment ceux de Kherzet Youcef et de Châabet-El-Hamra. La mine de zinc de Châabet-El-Hamra est aujourd'hui la seule exploitée, et le minerai extrait est acheminé vers le complexe minier de Kherzet Youcef pour y être traité. Cette description géologique résulte de la consultation de diverses références et études antérieures.

On exploite les gisements souterrains de diverses façons. Toutes ces méthodes comportent le creusement de puits et de galeries pour atteindre le minerai, et l'utilisation d'équipements mécaniques ou d'explosifs pour son extraction.

Le choix de la méthode d'exploitation repose sur la recherche d'un rendement optimal, permettant d'obtenir une production maximale à moindre coût, tout en garantissant la sécurité des mineurs. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs facteurs, tels que la forme, les dimensions et la continuité du gisement, la position de la masse minéralisée, les propriétés minéralogiques et physiques du minerai et des roches encaissantes, ainsi que les conditions de communication du gisement avec la surface.

I.2 Situation géographique

Les gisements de Châabet-El-Hamra et de Kherzet Youcef de la région d'Ain Azel appartiennent au domaine méridional des hauts plateaux. Ils se situent à 250 km au Sud-est d'Alger et à 50 km au Sud de la ville de Sétif. La mine de Châabet-El-Hamra se trouve à 12 km au Nord-Ouest du complexe minier de Kherzet Youcef. Le gisement de Châabet-El-Hamra est situé à vol d'oiseau, à environ 250 km au Sud-Est d'Alger et 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 (Figure I.1)

Les coordonnées géographiques du point central sont : 35°45'N et 5°30'E. L'altitude du site varie de 950 à 1200 mètres. [9]



Figure I.1 : Situation géographique du gisement de Châabet-El-Hamra.

I.3 Situation géologique

Les gisements de Châabet-El-Hamra et de Kherzet Youcef font partie de la limite septentrionale des Monts du Hodna qui renferme d'importantes minéralisations en Pb-Zn. Le gisement de Kherzet Youcef est situé dans une zone d'affaissement dans la région d'Ain Azel.

Du point de vue litho stratigraphique de cette région deux formations ont été identifiées:

- (1) La plaine d'Ain Azel à l'est qui est une formation alluvionnaire d'une épaisseur de 250 m d'âge mio-plio-quaternaire et qui est constituée de sable, gravier, galets, grès, argiles et conglomérats;
- (2) Des formations carbonatées et gréseuses du Barrémien (la dolomie, marne, argile) d'environ 700 m d'épaisseur à l'ouest. [10]

I.3.1 Géologie Régionale de Kherzet Youcef

La région de Kherzet Youcef constitue la limite septentrionale des monts du Hodna. Elle se trouve dans une zone d'affaissement au sud du môle de Aïn Mlila caractérisé par des dépôts marno-carbonatés du Méso-Cénozoïque reposant sur le socle plissé de la plate-forme épi-hercynienne. [11]

La structure générale est représentée par une série d'anticlinaux à noyaux jurassiques ou crétacés et de sillons comblés de formations Miocènes à Post-Miocènes

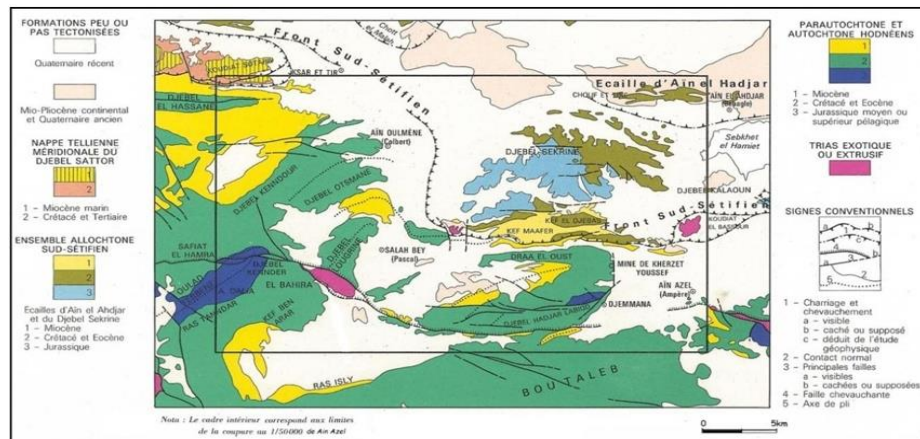


Figure I.2 : Carte géologique de la région Ain Azal

I.3.2 Géologie locale du gisement de Kherzet Youcef

Le gisement de Kherzet Youcef est associé à une série dolomitique de plateforme instable et subsidente d'épaisseur de 170-190 m. Cette série est composée de bancs de dolomie, marnes, de dolomie marneuse et de laminâtes. Notant que les faciès dolomitiques passent à des calcaires allant vers l'Ouest. Le gîte est constitué d'un vingtaine des couches minéralisées à des intensités variables. Le gisement est limité par la faille de Kherzet Youcef à l'est.

- **L'Albien** : correspondant à une alternance marno-calcaire généralement recouverte par le quaternaire, présente une épaisseur de 175 m. Le passage stratigraphique Aptien-Albien est marqué par des niveaux de condensation à faunes variées et un changement lithologique net.
- **Le Cénomanien** : il est constitué par trois ensembles :

-Un ensemble inférieur d'une épaisseur de 60 m rapporté au Vraconien formé par des grés grossiers à la base, surmonté par des marnes jaunes à ammonites (Villa, 1977) et à intercalations de calcaires gréseux.

-Un ensemble médian de 300 m d'épaisseur correspondant au Cénomanien constitué par une alternance de marnes et de calcaires marneux qui se termine par des bancs de calcaires fossilifères.

-Un ensemble supérieur d'une épaisseur de 120 m, représentant le Turonien, et des calcaires à débris de rudistes auxquels succèdent des niveaux dolomitiques massifs à rognons de silex.

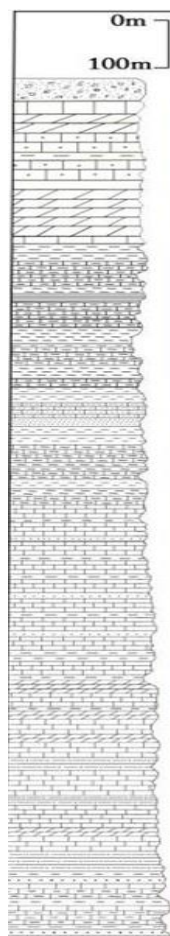
➤ **Le Miocène :**

Le Miocène d'une épaisseur de 200m, est constitué de la base au sommet par:

- ✓ Des conglomérats à fragments de calcaires et de dolomies.
 - ✓ Un ensemble de calcaires gréseux avec des intercalations marneuses Des dolomies en bancs métriques
 - ✓ Des calcaires à silex en bancs centimétriques et décimétriques de couleur grisâtre.
- **Le Quaternaire :**

Le Quaternaire inférieur est constitué par des marnes lacustres insignifiantes et des calcaires.

Le Quaternaire supérieur est représenté par des proluviaux à gros blocs et galets avec des intercalations de limons sableux et limons (10 à 15 m) et par des colluvions dégrés et de galets (1 à 2m), des galets alluviaux et des interlits de limons sableux d'argile et de sable à grains fins (Figure I.3) [9]



Age	Lithologie	Caractères hydrogéologiques probables
Mio-Plio-Quaternaire	Sables, graviers, galets et conglomérats	Formation perméable
Miocène	Calcaires, calcaires gréseux dolomies et conglomérats à la base	Formation perméable
Turonien	Dolomies à silex et calcaires	Formation perméable à semi-perméable
Cénomanién	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Vraconien	Marnes, calcaires gréseux et grès	Formation perméable
Albien	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Aptien supérieur	Alternance de calcaires, grès, marnes et marneux calcaire	Formation perméable à semi-perméable
Aptien inférieur	Alternance de marnes, calcaires et dolomies	Formation perméable à semi-perméable
Barrémien supérieur	Alternance de calcaires, marnes gréseux et dolomies	Formation perméable
Barrémien inférieur	Alternance calcaro-marneuse, dolomies et grès	Formation perméable

Figure I.3 : Zones susceptibles d'être affectées par la présence de polluants métalliques sur le site de Kherzet Youcef.

I.3.3 Minéralogie du gisement de kherzet Youcef

La minéralisation se présente sous forme de remplissage de fractures dans la roche, qui ont subi une stylolitisaiton intense et une fracturation en accord avec les contraintes géologiques. À l'échelle macroscopique, cela peut se manifester par des veines de minéraux visibles à l'œil nu, qui traversent la roche en remplissant des fissures ou des failles. À l'échelle microscopique, la minéralisation se présente sous forme de cristallisation dans les espaces entre les grains de roche ou dans les fractures microscopiques. Les minéraux peuvent former des cristaux distincts ou remplir les pores de la roche. La forme exacte de la minéralisation dépendra des conditions géologiques et des processus de formation qui ont conduit à la concentration des minéraux dans la zone de la mine [11]

Tableau I.1 : Tableau de minéralisation des mines Kherzet Youcef et Châabet-El-Hamra

Minéraux sulfurés	Sphalérite (ZnS)	Les gisements de Chabet El Hamra et de Kherzet Youcef sont riches en sphalérite, un minéral couramment présent. Elle est souvent associée à la pyrite, la marcasite et différentes formes de dolomites. Dans la mine de Kherzet Youcef, la proportion de sphalérite peut atteindre jusqu'à 40-60%, tandis que dans d'autres zones, elle est présente à un taux minimum de 10-15%. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	Galène (PbS)	Le gisement de Kherzet Youcef contient une quantité importante de galène, allant jusqu'à 30% de la composition totale, tandis que dans le gisement de Chaabet El Hamra, la galène est rarement présente mais se présente sous forme de plages cristallisées triangulaires. (OUCHENE Midou, 2010)
	pyrite (Fe ₂ S)	les chercheurs ont constaté une rare présence de pyrite qui se présente sous forme de micro-individus (1 à 5 microns) dans la roche argilo-carbonatée. Elle est également disséminée en petits grains dans l'encaissant dolomitique. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	marcasite (FeS)	La mine de Kherzet Youcef est caractérisée par une abondance de marcasite, un sulfure courant qui agit comme ciment dans les brèches dolomitiques près de la faille. Les analyses ont révélé la présence d'éléments traces tels que l'arsenic, l'argent, le bismuth, le cobalt, le cuivre, le gallium, l'antimoine, le nickel, le niobium et l'yttrium dans la marcasite, à des concentrations de l'ordre du ppm. La teneur moyenne en zinc dans la région est d'environ 25%. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	chalcopryrite (Cu,FeS)	Est une espèce minérale composée de cuivre, de fer et de soufre. Elle est souvent associée à la galène ou incluse dans cette zone d'étude. Les cristaux de chalcopryrite, qui ont une couleur jaune doré, peuvent se présenter sous forme sub-automorphe (MERCHICHI Amira, 2013)
Minéraux de gangue	Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	Le principal minéral de gangue, qui forme l'encaissant direct des sulfures, est la dolomite. Elle peut prendre différentes formes, telles que compacte, caverneuse, ou renfermant des cavités et des fissures.
	Barytine (BaSO ₄)	La barytine est rarement présente sous forme de filonnets monominéraux, et se forme après la sphalérite et la pyrite. Elle a une couleur blanche, parfois rosâtre en raison d'imprégnations d'hématites. (HENNI Abderrahmane, 1998)

	Calcite (CaCO ₃)	La calcite est présente sous forme de veinules dans les roches encaissantes, ainsi que dans des nids qui tapissent les géôles et forment des druses bien développées. Elle est également le composant principal des calcaires. (OUCHENE Midou, 2010)
	Quartz (SiO ₂)	Le quartz est rarement présent dans le gisement de chaabet El Hamra et Kherzet Youcef et se présente sous forme de cristaux subautomorphes à automorphes. Il s'agit d'un quartz diagenétique qui se trouve en faible quantité dans le gisement de Chabet El Hamra (MERCHICHI Amira, 2013)
	Hématite ((Fe,Al) ₂ O ₃)	La région de Chabet el Hamra est riche en hématite, un minéral bien formé présent dans des veines de 1 à 2 cm d'épaisseur. On peut également observer des veines de barytine et de dolomie, ainsi que des cristaux de calcite rhomboédrique.
	6. Fluorite (CaF ₂)	Moins abondante, est souvent associée à la barytine et à la calcite dans les espaces vides du champ minier. (MERCHICHI Amira, 2013)

Tableau I.2 : Nature de la minéralisation du gisement de Kherzet Youcef.

Roche encaissante-Age	Minéralisation	Type de minéralisation	Réserves en minerais
Dolomie à grains d'âge Barremien. (Crétacé inférieur)	Galène Sphalérite Marcassite Pyrite Barytine Anhydrite	Stratiforme caverneux pour minerais Zn et massive ou veinée pour minerais Pb	1.6 MT avec 18.4% de Zn et 3,6 % de plomb

I.4 Hydrologie et Hydrogéologie de Kherzet Youcef

Quatre niveaux aquifères sont localisés dans la région dont la mine fait partie. D'après les données récoltées des études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques par l'ENOF et l'ORMG, on distingue:

Nappe Barremienne: Elle se situe à l'ouest de la faille de Kherzet Youcef, d'une épaisseur de 700m, celle-ci affleure en surface à niveau piézométrique d'environ 929m.

Ce niveau est caractérisé par l'existence de formations sédimentaires regroupant des calcaires, marnes, dolomies et grès. Le corps minéralisé de la mine de Kherzet Youcef est encaissé dans cette formation, un réseau de failles et de fractures permet la circulation des eaux souterraines dans les formations Calco-Dolomitiques.

Nappe Albo-Aptienne: Elle se trouve dans le côté est de la mine de Kherzet Youcef, caractérisée par des formations sédimentaires regroupant des calcaires karstiques, des calcaires marneux ainsi que des intercalations gréseuses.

Cette nappe est isolée de la Barremienne par une faille.

Nappe Mio-Plio-Quaternaire: Cette Nappe est localisée à l'Est de la faille de Kherzet Youcef, son épaisseur peut aller jusqu'à 250m à certains endroits.

Cette formation est de type sédimentaire détritique continental hétérogène représenté par l'existence d'intercalations entre des conglomérats et des grès, des argiles, des marnes, des calcaires lacustres ainsi que des galets intercalés avec des limons sableux.

Nappe Superficielle : La genèse de cette nappe est due aux eaux superficielles générées par les précipitations ainsi que les eaux de ruissellements qui proviennent du relief intra-montagneux entourant cette zone.

Ceci a conduit à la formation de plusieurs sebkhas telles que: Sebkhet El Hamiet et Chott El Beida et aussi a favorisé le phénomène d'évaporation. [12]

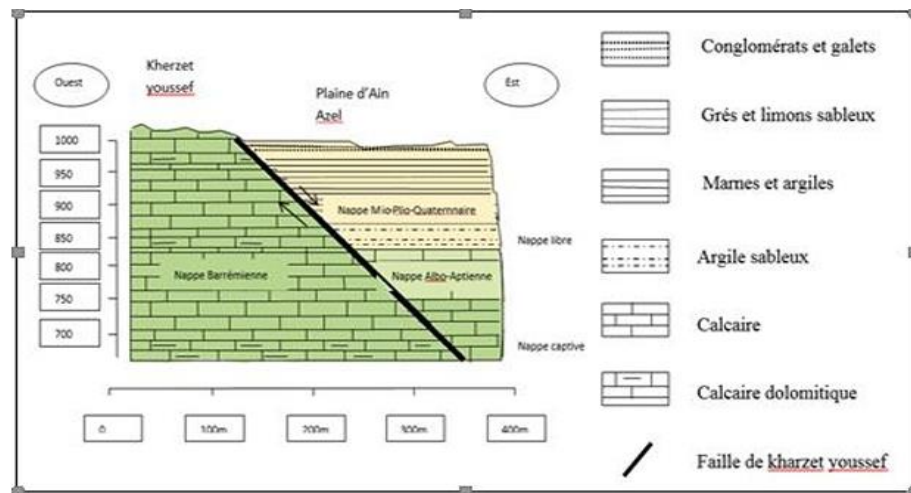


Figure I.4 : Coupe hydrogéologique schématique de la région de Kherzet Youcef.

I.5 Géologie régionale de Chaâbet-El-Hamra

Le gisement de Chaâbet-El-Hamra fait partie de la zone métallogénique du HODNA au raccordement tectonique de trois (03) structures distinctes :

- Le secteur est de l'Atlas Tellien,
- Le secteur sud de l'Atlas saharien, et
- Le massif médian le môle d'Ain Mlila.
- Les formations du Crétacé inférieur sont prédominantes et constituées essentiellement de dolomies massives, degrés, de calcaires et de dolomies gréseuses.

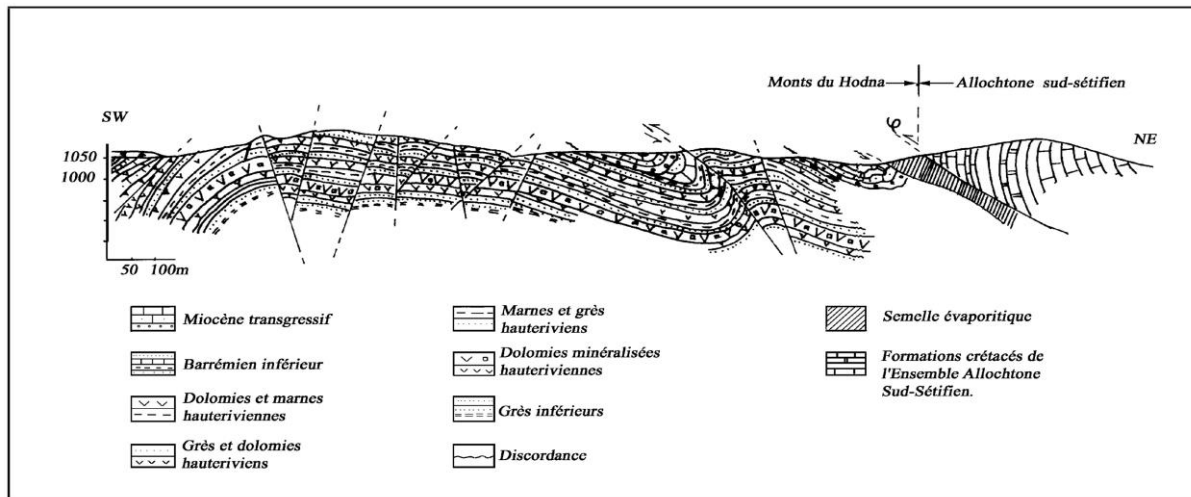


Figure I.5 : Colonne stratigraphique du gisement Chaâbet El Hamra

I.5.1 Géologie locale de Châabet El-Hamra.

Le gisement de Châabet El-Hamra, fait partie du « district métallogénique » à Pb Zn des monts du Hodna qui renferme d'importantes minéralisations en Pb-Zn localisées dans la région d'Ain Azel. Le gisement de Châabet El-Hamra appartient aux blocs d'Ain M'Lila, qui comprend trois structures de soulèvement en forme de Horst-Anticlinaux. Le gisement est associé au Horst de Rahbat (Figure I.6) [13]

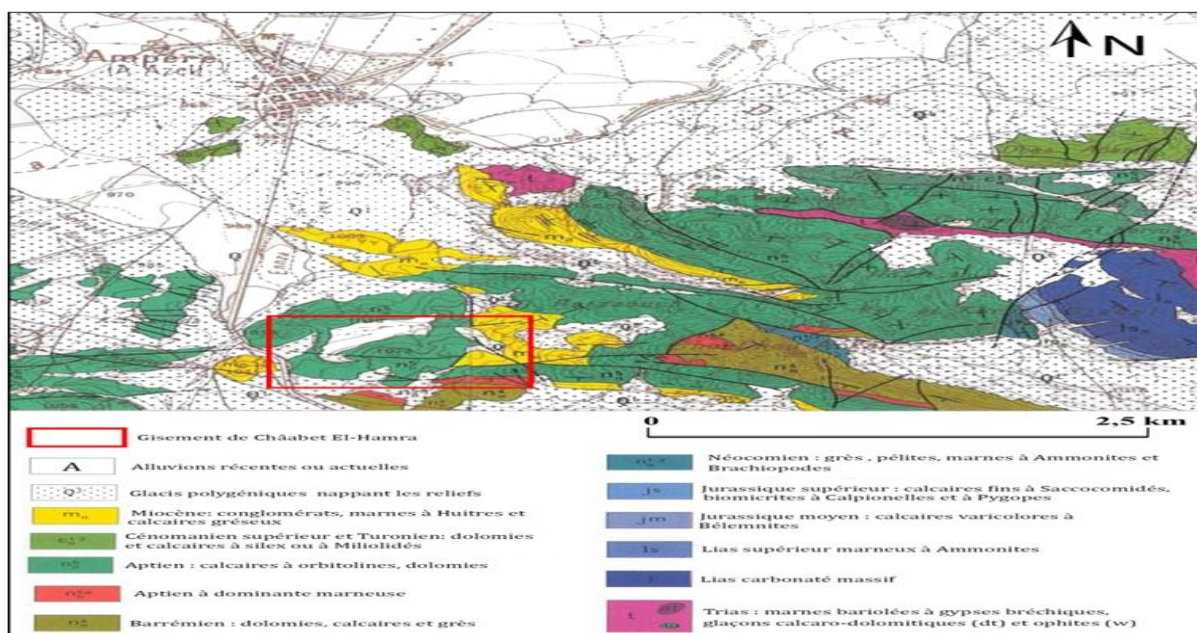


Figure I.6 : Carte géologique des environs de la mine de Châabet El-Hamra (D'après Carte géologique au 1/50.000 d'Ain Azel, Sonatrach, 1977)

I.5.2 La minéralisation de Chaâbet El-Hamra

La minéralisation du gisement de Chaâbet El-Hamra est observée en faisceaux sous forme de lentilles minéralisées de composition tantôt mono-minérale, tantôt mixte.

Elle est représentée essentiellement par la sphalérite, la pyrite, la marcassite, la galène rencontrée rarement et donc sans importance industrielle.

Dans cette composition, les principaux minéraux sont la sphalérite, la pyrite et la marcassite. Les minéraux secondaires sont la galène, l'hématite. Les minéraux de gangue sont la calcite, la barytine, la dolomie et plus rarement le quartz et le gypse (rare). Les minéraux d'oxydation sont principalement la smithsonite, la cérusite et la limonite.

La minéralisation de pyrite, marcassite, blende et rarement galène est intimement liée aux roches dolomitiques hauteriviennes, en se localisant indépendamment aux structures tectoniques affectant ce niveau porteur de la minéralisation.

La minéralisation zincifère se présente en couches lenticulaires, regroupées dans deux faisceaux stratiformes, séparés par le banc de dolomie blanchâtre stérile, de 6 m de puissance.

La galène est très rare, et se développe généralement aux extrémités des lentilles, limitant la zone zincifère de celle baryto-pyritifère.

La sphalérite se présente sous plusieurs types : massif, en tache de recristallisation, fissure, et bréchique ce qui constitue l'essentiel du minerai industriel. [14]

I.5.3 Hydrogéologie de Chaâbet El-Hamra :

Les données géologiques et hydrogéologiques confirment l'existence de deux nappes libres (Fig I.7) : Dans la partie centrale du gisement, existe une nappe contenue dans les formations hauteriviennes carbonatées à perméabilité de fissure. Dans la partie Nord-Ouest du gisement une nappe aquifère est reconnue dans les formations barrémiennes. Cet aquifère est associé aux grès dolomitiques [15]

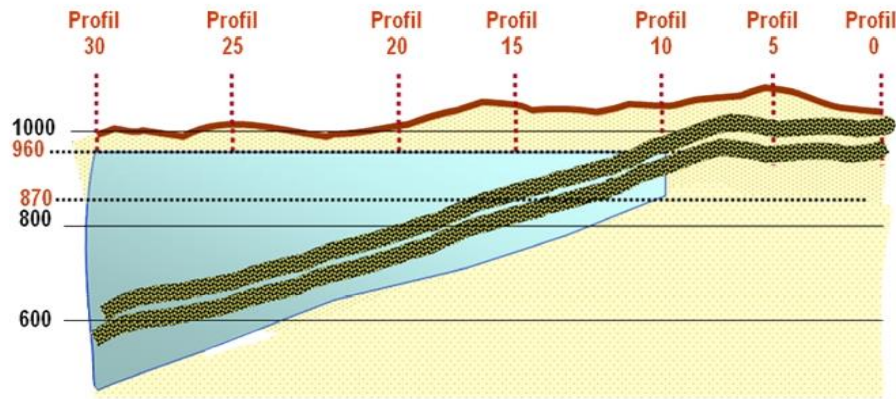


Figure I.7 : Coupe hydrogéologique Profil 0– Profil 30 (D'après ENOF 2003)

I.6 Réserves géologiques

Le projet d'exploitation des réserves de Chaâbet El-Hamra retenu par l'ENOF n'a pris en considération que les réserves situées entre les profils 0 et 15 pour les raisons suivantes entre les profils 16 et 24, il existe un secteur d'environ 800 m de longueur à l'intérieur duquel les corps minéralisés sont absents ou présentent des teneurs et des épaisseurs insuffisantes pour justifier leur exploitation figure.I.8.

Au-delà du profil 15, les données hydrogéologiques sont plus contraignantes. La partie du gisement située entre les profils 15 et 31 plonge vers le Nord-Ouest avec un angle plus prononcé que la moyenne (approximativement 15 °). Cette particularité causera de plus grandes difficultés d'ouverture et d'exploitation. [11]

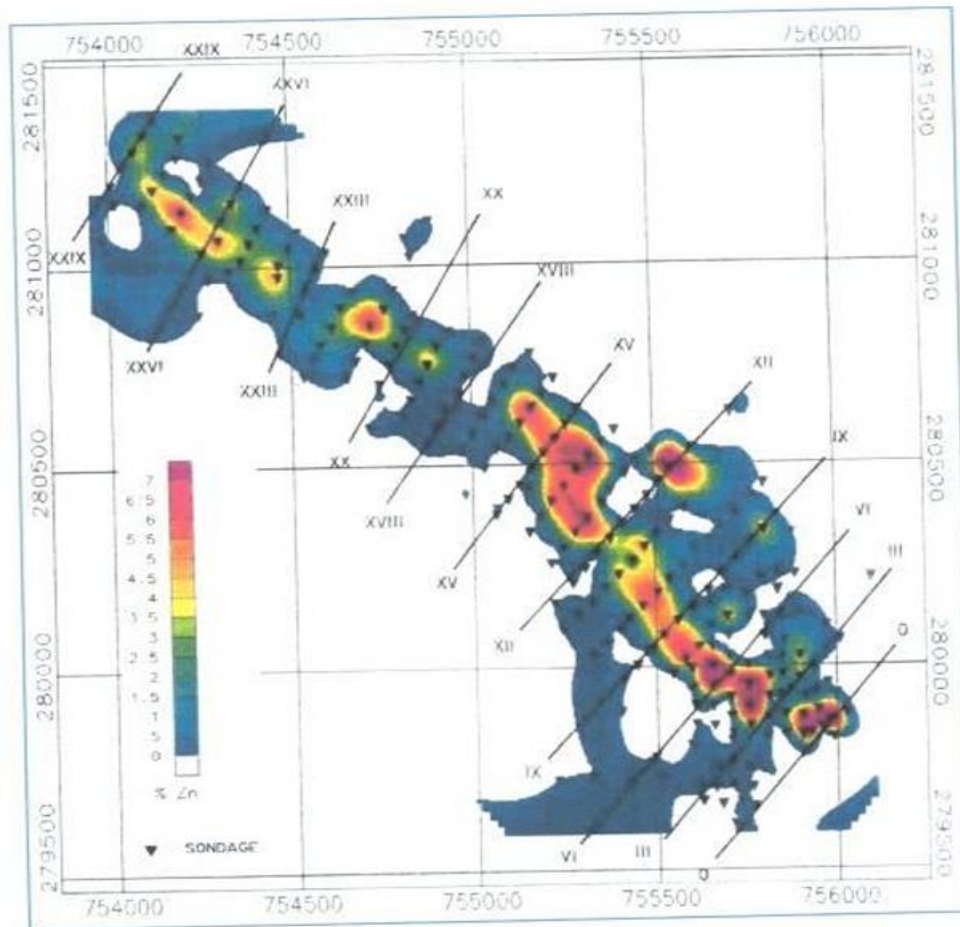


Figure I.8: Distribution des teneurs en Zn des corps minéralisés de Chaâbet E1-Hamra (D'après le bureau d'étude canadien SIDAM)

I.7 Exploitation

Il existe une relation entre la méthode d'exploitation et les caractéristiques du gisement afin de permettre une récupération optimale des réserves. Toutes ces méthodes permettent de suivre les irrégularités des formations minérales filoniennes, d'amas ou de couches épaisses. [15]

I.7.1 Méthodes d'exploitation :

I.7.1.1 Choix de la méthode d'exploitation :

Le choix d'une méthode d'exploitation dépend de plusieurs facteurs et qui sont :

- L'importance du gisement

- Les variations des teneurs La puissance,
- le pendage et l'irrégularité de la formation
- La stabilité de la couronne
- La dureté, les caractéristiques physico-mécanique du minerai et des encaissants et la nature des épontes.

Pour le gisement de Chaâbet El- Hamra, les méthodes d'exploitations retenues sont :

- ✓ Des chambres et piliers abandonnés soit en un seul niveau pour des épaisseurs inférieures à 5 m soit à deux niveaux pour des épaisseurs supérieures à 5 m
- ✓ Traçage et dépilage [15]

I.8 Technologie de traitement du minerai

Après extraction du minerai, celui-ci subit un traitement physique consistant à éliminer une grande partie de la gangue. Dans le cas des minerais sulfurés, une flottation est généralement effectuée. La flottation consiste à séparer d'une part les parties valorisables d'un minerai et d'autre part la gangue, en jouant sur leurs propriétés de surface et plus particulièrement sur le caractère hydrophobe ou hydrophile (mouillant) de celles-ci. Avant de pouvoir séparer les constituants du minerai, les particules valorisables sont libérées par broyage et sera d'autant plus poussé que, par exemple les sulfures métalliques à récupérer, seront disséminés dans le minerai sous forme de fines particules. Ainsi, les blocs de quelques m³ extraits de la mine seront broyés jusqu'à atteindre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres.

La flottation est réalisée dans des cuves dans le quelles le minerai broyé est mis en suspension aqueuse. Des ajouts éventuels sont effectués pour ajuster le pH, modifier les propriétés de surface des particules à l'aide de collecteurs, former des mousses stables. D'autres ajouts permettent de moduler l'action des agents collecteurs : des déprimants augmentent le mouillage, des activant annihilent les effets des déprimants. Par ailleurs, une arrivée d'air permet de former des bulles qui entraînent en surface les éléments valorisables qui se retrouvent dans les "mousses". Ces dernières, après séchage, donnent des concentrés. Il est également possible de séparer sélectivement divers sulfures métalliques d'une part de la gangue et d'autre part entre eux. Après flottation les concentrés contiennent de 40 à 60 % de

Zn sous forme ZnS. Lors de la flottation le zinc n'est pas transformé chimiquement, il reste sous forme de sulfure de zinc [16].

I.8.1 Traitement mécanique :

I.8.1.1 Section de concassage et de criblage :

L'installation de préparation du minerai est conçue pour fonctionner avec une cadence de l'ordre de 300 t/j.

Le concassage c'est l'action de réduire en petites parties la matière dure et sèche. Cette étape permet d'amener le minerai à une granulométrie où les minéraux économiques pourront être séparés de la gangue. La réduction du tout-venant de (0 à 300mm) jusqu'à (0 à 15mm) s'effectue à l'aide d'un outil appelé le concasseur (à mâchoire et à cône) en deux étapes :

A -Première étape :

Le produit abattu est transporté dans des camions et déversé dans la trémie de récupération d'un volume de 30 m³. Le minerai est introduit dans un concasseur à mâchoires, et sort avec une dimension de 0 - 40 mm.

B -Deuxième étape :

Les produits issus du concasseur à mâchoires et du crible sont acheminés à l'aide d'un convoyeur ou transporteur à bande N°01 d'une longueur de 82 m, vers le crible vibrant de type (SIMONS) à maille (15*160 mm) ; la classe granulométrique supérieure à 15 mm est introduite dans le concasseur à cône, qui fonctionne en cycle fermé avec le crible vibrant.

La fraction qui passe par le crible (0 – 15 mm) est déversée dans deux trémies métalliques d'une capacité de 25 tonnes chacune de ces trémies. Le minerai est acheminé vers le corps principal de laverie par l'intermédiaire du convoyeur à bande par suite vers la section broyage à l'aide de la bande N°02.



Figure I.9 : Vue de la section de concassage et criblage de l'usine de Kherzet Youcef

Les caractéristiques techniques des équipements de la section de concassage et de criblage sont :

➤ **Le concasseur à mâchoire :**

- Type VB-75 ;
- Ouverture 380 X 570mm avec vidange 40mm ;
- Capacité 75 T/h.

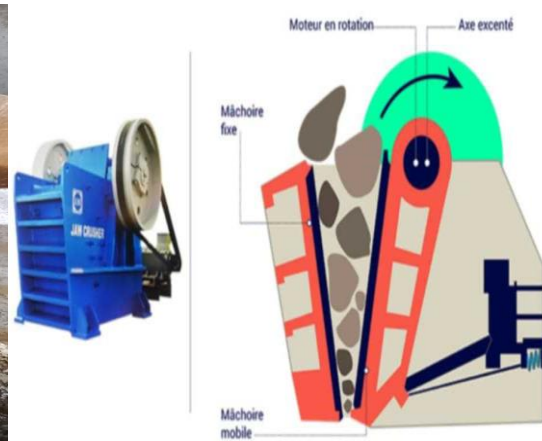


Figure I.10 : Vue de la section concassage à mâchoire, usine de Kherzet Youcef

➤ **le crible vibrant :**

- Type (SYMONS-NORBERG).
- Dimension de la maille 20 mm.
- Capacité de production 150T/h

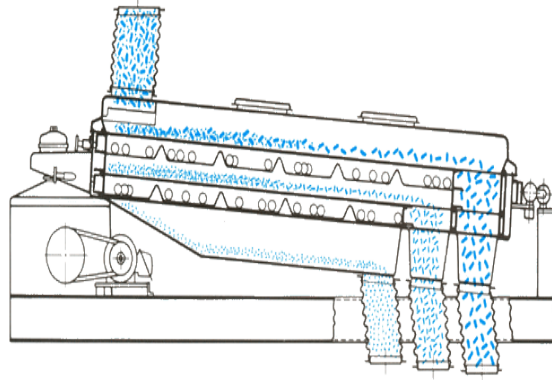


Figure I.11 : Vue de crible vibrant

➤ **concasseur à cône**

- Type KCT-1200 ;
- Diamètre 1200 mm ;
- Orifice d'évacuation 10 mm ;
- Capacité de production 45 T/h.

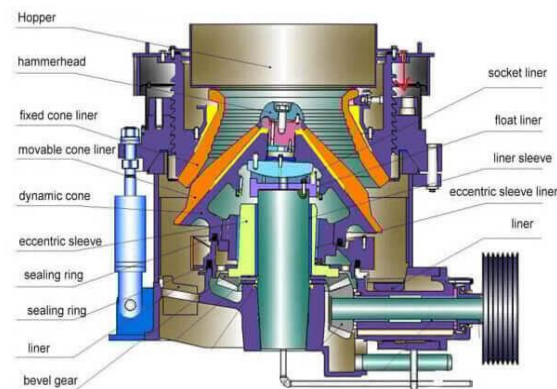


Figure I.12 : Vue de concasseur à cône

I.8.1.2 Section de broyage et classification

Le broyage et classification visent à révéler les particules minérales et ce qui garantit les conditions optimales à obtenir une récupération au maximum des parties intégrantes utiles avec la qualité la plus haute possible et une consommation d'énergie et de réactif minimale.

A- Le procédé de broyage s'effectue par deux broyeurs

Par un broyeur à boulets N1 fonctionnant en cycle fermé un classificateur mono spirale me broyage et la classification s'effectuent dans les limites. Ceci dans le but d'assurer la capacité nécessaire de production et les paramètres technologiques.

B- Equipement et installation de la section de broyage et classification

- Broyeur à boulets
- $\phi 2100$ mm et longueur 2200 mm
- Capacité 6.2 m³

C- Calcul de capacité de production des broyeurs

$$Q = (V \cdot q \cdot 100) / (B_1 - B_2) \quad (\text{t/h})$$

$$V = 6,2 \text{ m}^3$$

$$q: \text{ production du broyeur} = (0,95 \text{ t/m}^3 \text{ H})$$

B1: Teneur de la classe (0,08 mm) dans le minerai broyé 70%

B2: Teneur de la classe (0,08mm) dans le minerai broyé 11%

$$Q = (6,2 \cdot 0,95 \cdot 100) / (70 - 11)$$

$$Q = 9,98 \text{ (t/h)}$$

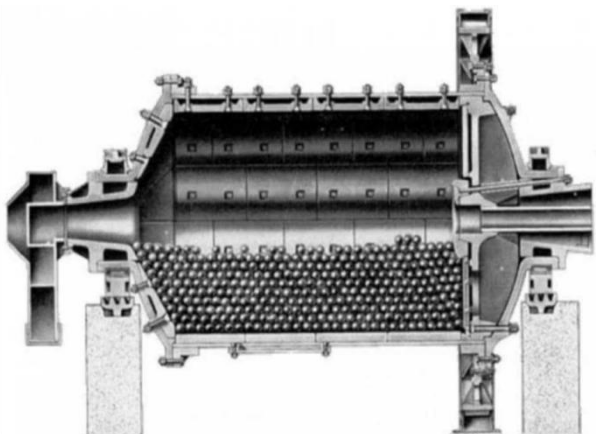


Figure I.13 : Vue de broyeur à boulet

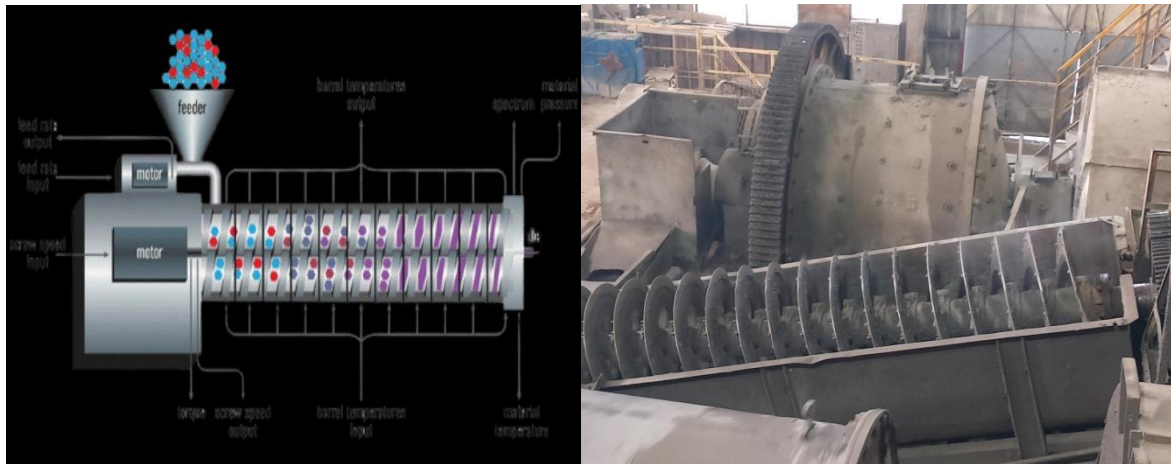


Figure I.14 : Vue de Classificateur à vis

T-venant

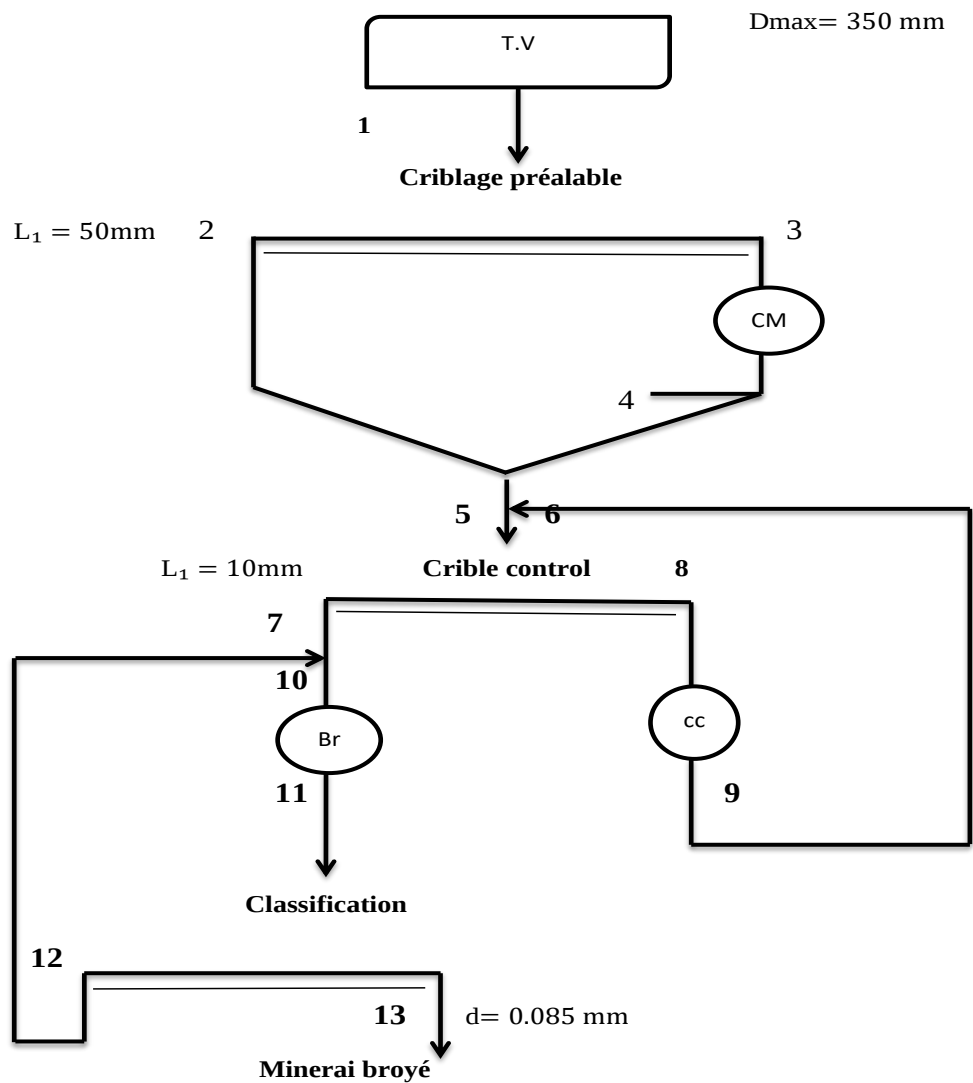


Figure I.15 : Schéma technologique de préparation mécanique pour kherzet Youcef

I.8.2 Enrichissement

La flottation est une méthode qui permet de séparer des minerais broyés sous forme de particules en les immergeant dans le milieu liquide où ces particules, fixant les bulles d'air, voient leur densité diminuer.

Au niveau de cette section, le processus de traitement de minerai du zinc se fait avec un ensemble de réactifs chimiques, présentés principalement par:

- ✓ Collecteur : amylaxanthate
- ✓ Activant: sulfate de cuivre (CuSO_4)
- ✓ Régulateur du milieu: la Chaux (CaO)
- ✓ Moussant : l'huile de pin

I.8.2.1 Flottation et filtration

Après la préparation mécanique, le minerai est soumis à un circuit de flottation, qui permet d'obtenir des concentrés à partir desquels les minéraux économiques sont extraits. Dans ce circuit, le zinc est le produit recherché, et le processus de flottation est composé de plusieurs étapes : La flottation principale ou dégrossissage de Zinc, La flottation de contrôle ou épuisage du Zinc, ainsi que trois stades de flottation de relevage du concentré de Zinc.

Les produits non flottés de l'épuisage sont dirigés vers la digue des stériles, tandis que le pré concentré du premier relevage et les mousses de l'épuisage sont renvoyés en tête du dégrossissage.

Le concentré de zinc est récupéré grâce aux mousses obtenues lors du 3eme relevage du processus de flottation. Ces mousses sont envoyées vers un épaisseur pour en augmenter la densité avant de passer à travers des filtres rotatifs à vide. Ceux-ci permettent de séparer l'eau du concentré, qui est alors stocké à l'air libre sous forme de produit marchand prêt à être commercialisé. Cette étape est essentielle pour la qualité du produit final, car elle permet de garantir une concentration en zinc optimale.

Le concentré est obtenu avec une teneur en Zn de 53%. Le taux de récupération du métal contenu dans le minerai est élevé, de l'ordre de 85%.

Les réactifs utilisés pour la flottation de Zinc dans l'usine de traitement du minerai de Chaâbet El- Hamra sont les suivants :

- La chaux hydratée comme régulateur avec une consommation moyenne de 2560g/t ;
- Le sulfate de cuivre, comme activant une consommation moyenne de 250 à 500g/t ;
- Le Xanthate Isobutyl, comme collecteur une consommation moyenne de 50 à 150 g/t ;
- L'huile de pin, comme moussant, de 25 à 75 g/t ;
- Le Sulfate de Zinc. [12]

I.8.2.2 Circuit de flottation:

Les circuits de flottation sont une technologie courante pour la concentration d'une large gamme de minéraux et de traitements des eaux usées. La flottation par mousse est basée sur les différences de capacité des bulles d'air à adhérer à des surfaces minérales spécifiques dans une suspension solide/liquide. Les particules avec des bulles d'air attachées sont transportées à la surface et éliminées, tandis que les particules qui ne sont pas attachées aux bulles d'air restent dans la phase liquide.



Figure I.16 : Cellule de flottation type Denver.

I.8.2.3 Flottation Dégrossissage

C'est la première opération de flottation effectuée, le résultat donne un concentré de mauvaise qualité qui doit être relavé. Ensuite, l'épuisage est consacré au rejet de dégrossissement, son but est de récupérer le maximum de zinc perdu dans ce rejet. Il donne le rejet final du circuit de flottation, et son concentré est recyclé vers le dégrossissement.

Puis le relevage, il retraite le concentré de dégrossissage dont la teneur n'est pas à la valeur requise. Les rejets du circuit de relevage sont recyclés vers le circuit principal. Le nombre de cellules de relevage est faible, car le but de cette étape est de produire un concentré riche. Il donne un concentré de zinc de 53%.

Le concentré de zinc subit deux autres opérations de relevage dans le but est de laver le concentré contenant des réactifs et d'éliminer l'eau dans laquelle il se trouve pour obtenir le concentré de zinc dans un état de gâteau par moyen d'égouttage.

Lors de l'épaississement les particules sont soumises à la loi de la chute des particules ou des solides dans un milieu liquide ou bien fluide, où la vitesse de chute des particules augmente en fonction de leur dimension et de leur densité et les épaisseurs donnent une surverse tandis qu'à la base ils donnent un produit boueux ou une sous-verse.

Une pompe à diaphragme assure l'évacuation des produits sédimentés. Le pourcentage de solide peut atteindre 60% en poids dans un épaisseur alimenté avec une pulpe à 30% en poids de solide. Les produits, déposés au fond de la cuve, sont raclés par une spirale ou un râteau vers l'orifice de sortie en liaison avec la pompe

Enfin, la filtration est la séparation d'une phase continue liquide ou gazeuse et d'une phase dispersée (solide ou liquide) initialement mélangées. Alors on cherchera à récupérer soit la phase continue débarrassée au maximum de la phase dispersée (filtration de l'aire ou de l'eau...), soit la phase dispersée (récupération d'un précipité cristallin, de poussière de métal précieux dans une fumée etc.).



Figure I.17 : Filtration de concentré de flottation de blende Zn.

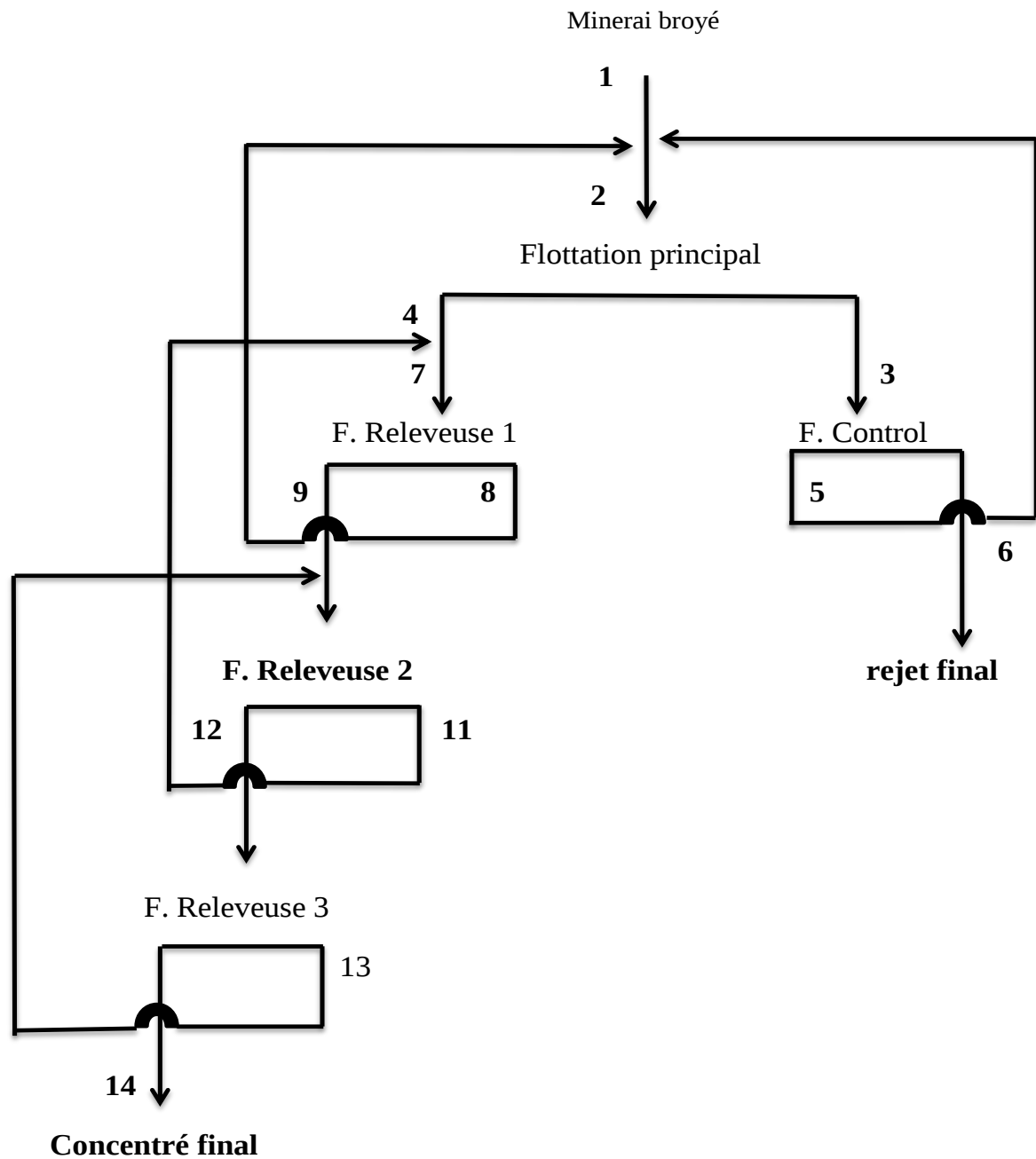


Figure I.18 : Schéma de traitement par flottation d'un minerai de zinc de khereztyoussef

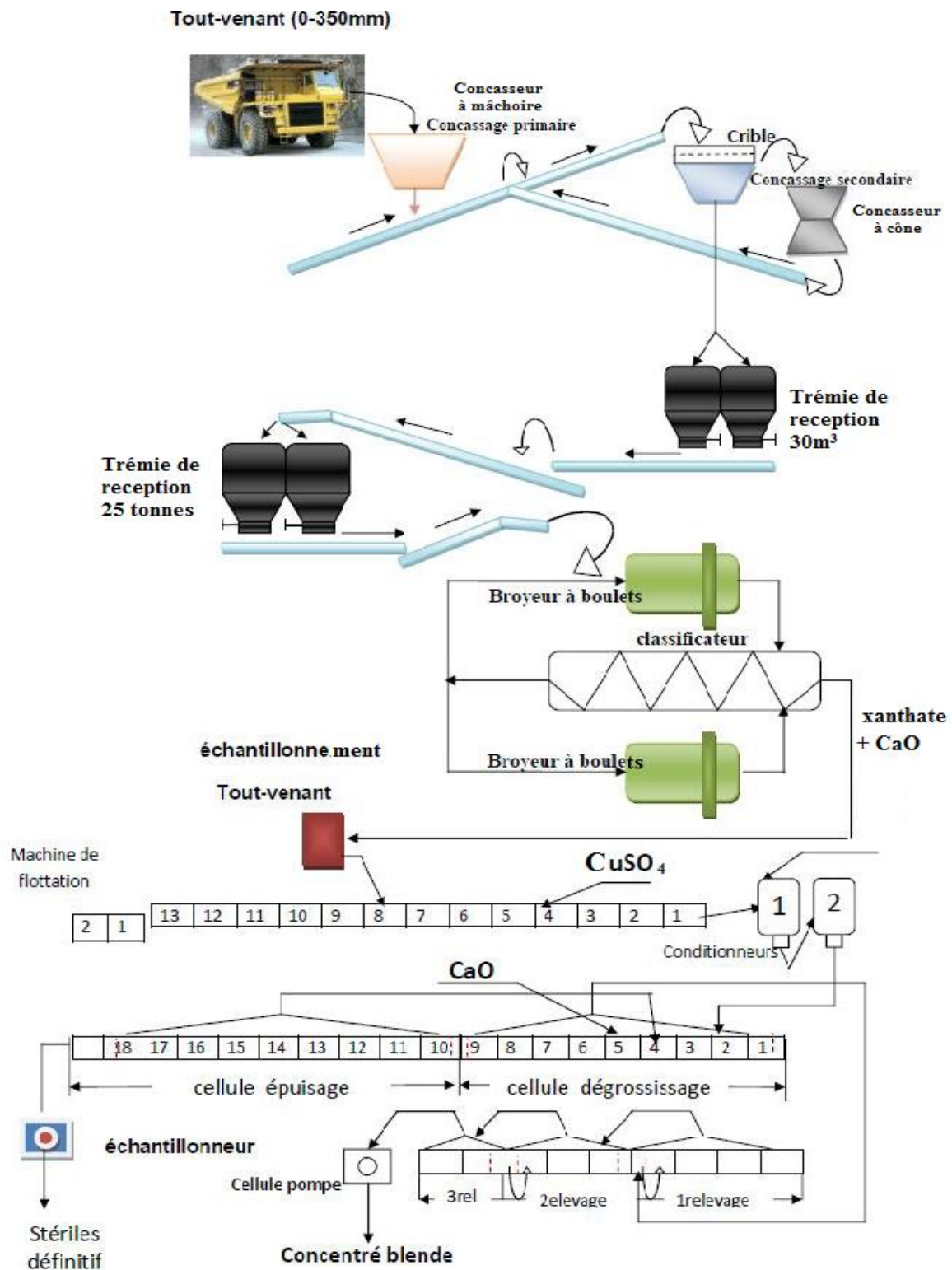


Figure I.19 : Diagramme de La chaîne technologique du traitement du minéral de Chaabet-El-Hamra.

I.9 Conclusion

La chaîne de traitement des minerais, visant la concentration des sulfures métalliques à valeur économique, constitue un système intégré influençant directement les propriétés physico-chimiques de la surface de la pyrite présente dans les rejets.

La province géologique d'Ain Azel se caractérise par la présence de gisements de type sulfures massifs de plomb-zinc, dont l'exploitation nécessite la mise en œuvre de procédés de traitement adaptés, notamment le broyage et la flottation. Cette dernière est principalement orientée vers la récupération du zinc, considéré comme le principal élément valorisé.

Le broyage est réalisé en voie humide, dans un milieu alcalin avec un excès de chaux. Quant à la flottation du sulfure de zinc, elle comprend une étape d'activation par le sulfate de cuivre, suivie par l'ajout de collecteurs tels que les xanthates ou les dithiophosphates, permettant une séparation efficace du zinc. Le procédé de flottation se déroule en deux étapes successives : le dégrossissage suivi de l'épuisage. Le concentré obtenu subit ensuite une opération de relevage en deux stades afin d'améliorer sa qualité et sa teneur. Enfin, les rejets de l'usine de traitement sont constitués des différents résidus issus des étapes de flottation, ce qui nécessite une prise en compte particulière sur le plan environnemental.

CHAPITRE II:

Revue de littérature sur le Traitement des métaux lourds

II.1 Introduction

Dans le cadre de l'étude du traitement des minerais sulfurés et de la récupération des métaux de base, la compréhension des propriétés minéralogiques et chimiques du zinc, du plomb et du cuivre revêt une importance majeure, ces éléments constituant les principales cibles des opérations d'exploitation minière.

En effet, la présence de ces métaux dans des matrices minérales complexes, souvent associées à des minéraux sulfurés tels que la pyrite, impose l'adoption de techniques de traitement adaptées permettant d'assurer un rendement élevé ainsi qu'une séparation sélective efficace. Dans cette perspective, ce chapitre vise à fournir un cadre théorique complet concernant ces métaux, à travers l'étude de leurs propriétés physico-chimiques, de leurs domaines d'utilisation, ainsi que de leurs impacts sanitaires et environnementaux.

Le comportement de la pyrite est également abordé, notamment en ce qui concerne les phénomènes d'oxydation et d'altération, ainsi que leurs répercussions sur les procédés de flottation. Par ailleurs, le chapitre traite des techniques de traitement des minerais, en particulier la flottation, considérée comme une étape essentielle dans la concentration des sulfures, ainsi que les procédés hydrométallurgiques comprenant la lixiviation et l'extraction par solvant. Enfin, une attention particulière est accordée aux aspects environnementaux, notamment les effluents liquides issus de ces procédés, leur impact sur les ressources en eau, ainsi que la nécessité de leur gestion et de leur contrôle. Ainsi, ce chapitre constitue une base scientifique indispensable pour la compréhension des différentes étapes de traitement des minerais métalliques, en les reliant aux aspects environnementaux et sanitaires dans une approche intégrée.

II.2 Les métaux de base : propriétés et utilisation du zinc, plomb et cuivre

Ce sont les métaux communs utilisés dans l'industrie, on les trouve en plus grande quantité dans la croûte terrestre que les métaux précieux. Parmi les métaux de base, on trouve les métaux ferreux : fer, acier, fonte et les métaux non ferreux : cuivre, plomb, aluminium et zinc.

II.2.1 Le zinc

Le zinc est un élément chimique ayant le symbole Zn dont le numéro atomique est 30 et une masse molaire de 65.39g/mol, le zinc fut découvert plusieurs siècle A.C; il fut utilisé pour la fabrication de laiton. Ses plus importantes minéralisations sont :



Figure II.1 : Le zinc

- **la Sphalérite (Zn,FeS) :**

Ou bien la blende, c'est un minéral jaune, marron, ou bien noir; Elle représente la minéralisation zincifère la plus occurrente, fréquemment associée avec la galène (PbS). Elle contient souvent de l'Arsenic, du Cadmium et plusieurs autres éléments.

- **La Calamine :**

Cette appellation est souvent utilisée pour les minéralisations de zinc oxydé. En Grande Bretagne ce terme est utilisé pour la Smithsonite.

- **La Smithsonite (ZnCO_3)**

C'est un minéral de zinc associé avec la sphalérite, elle est d'une couleur jaune, grise, marron ou bien verdâtre.

- **La Willémites (Zn_2SiO_4)**

C'est un minéral de zinc mineur dont la couleur varie du blanc au marron et exhibe une fluorescence de jaune brillant sous les rayonnements ultra-violets

Les minerais zincifères se trouvent généralement côte-à-côte avec d'autres minéralisations métalliques telles que celles du plomb, cuivre et d'argent ainsi que d'autres métaux nobles. En

plus de ça le Cadmium est toujours associé aux minéralisations zincifères ayant une teneur de 0.3% i.e : pour chaque tonne de zinc extraite on peut avoir 3kg de Cadmium.

Le zinc est le 4^{ème} métal le plus produit au monde devancé seulement par le fer, l'aluminium et le cuivre dont 90% de la production est issue des minéraux sulfurés. Le métal du zinc est maintenant extrait des minerais par des procédés de pyrométallurgie ou bien des techniques d'électrolyse. [17]

II.2.1.1 Caractérisation physico-chimiques du zinc

Tableau II.1 : Tableau Caractérisation physico-chimique du zinc [9]

Numéro atomique	30
Famille d'élément	Métal de transition
Masse atomique	65.38 u
Rayon atomique	1.38
Point de fusion	419.58 °C
Point d'ébullition	907
Système cristallin	Hexagonal
Dureté	2.5
Couleur	Gris-bleuté

II.2.1.2 Utilisations et applications du zinc

Environ trois quarts de la production du zinc est utilisés comme étant un métal à l'état solide dont les applications sont vastes, on cite ci-dessous quelques-unes de ses utilisations :

- Comme couverture pour les métaux galvanisés afin de les protéger de la corrosion qui constitue la moitié de son utilisation;
- Comme poudre métallique dans les peintures anti-rouille;
- Comme métal pur dans la fabrication des batteries;
- Comme des feuilles métalliques pour l'étanchéité dans les différentes constructions et ceci depuis 1880 dans la cité moderne de Paris;

- Comme des anodes lors des processus d'électrolyse;
- Pour des alliages métalliques avec le cuivre afin de produire du bronze (15% de la production).

Le quart restant est utilisé comme composants des différentes peintures et pour des usages agricoles. C'est aussi un élément essentiel pour la croissance des êtres humains, les animaux ainsi que pour la végétation. [17]

II.2.1.3 Toxicités du zinc

Le zinc est un élément essentiel à la santé humaine, jouant un rôle crucial dans de nombreux processus physiologiques. Cependant, une consommation excessive de zinc peut entraîner des effets néfastes, connus sous le nom de toxicité du zinc.

✓ Symptômes de la toxicité du zinc sur l'humain

Les symptômes de la toxicité du zinc varient selon la forme et la gravité de l'intoxication. Les symptômes aigus les plus courants incluent :

- Nausées
- Vomissements
- Diarrhée
- Douleurs abdominales
- Crampes musculaires
- Céphalées
- Vertiges
- Perte d'appétit

✓ Formes de toxicité du zinc

On distingue deux types de toxicité du zinc :

- **Toxicité aiguë:** Provoquée par l'ingestion d'une dose importante de zinc en une seule fois.

- **Toxicité chronique:** Découle d'une consommation excessive de zinc sur une période prolongée. [49]

✓ Sur la faune et la flore

Le zinc provenant des activités humaines peut entrer dans la pollution de l'environnement. Les eaux usées industrielles riches en zinc polluent les sources d'eau propres, ce qui nuit à la vie de la faune et de la flore aquatique [19]

II.2.2 Le plomb

Le plomb est un élément chimique métallique dont le symbole est Pb et ayant le nombre atomique 82 dont le poids atomique est de 207.2 g/mol. Découvert et utilisé depuis l'antiquité (environ 4000 ans A.C). Ses plus importantes minéralisations sont :



Figure II.2 : Le plomb

- La Galène (PbS) qui est la minéralisation la plus importante et aussi une source importante d'argent, celle-ci se trouve beaucoup plus dans les dépôts calcaires, dolomitiques et gréseux.
- Les massifs sulfureux ainsi que les exhalations formées par des processus volcaniques et déposées dans les fonds maritimes.
- Les sédiments formés par des exhalations de fluides hydrothermaux qui sont riches en métaux et contiennent environ 4% de Pb

Le minerai de plomb est aussi associé aux minéraux zincifères (sphalérites) et surtout à ceux du cuivre [17]

II.2.2.1 Caractérisation physico-chimiques du plomb

Tableau II.2 : Tableau Caractérisation physico-chimiques du plomb [20]

Masse atomique	207
Numéro atomique	82
Aspect	▪ Gris terne ▪ Ductile, mou, fragile et d'une faible conductivité électrique. ▪ Se ternit à l'air humide mais est stable vis à vis de l'O₂ et H₂O ▪ Il existe 38 isotopes dont 4 sont stables dans la nature (Pb208, Pb207, Pb206, Pb204)
Densité	11.34 g/ml
Valence	• Divalent Pb²⁺: les plus stables (inorganiques) • Tétravalent Pb⁴⁺
Point de fusion	327°C
Point d'ébullition	1525° - 1740°C
Volatilité	A partir de 550°C
Etat à 20° C	solide
Solubilité	Eau => Solubilité non négligeable ; toxicité Lentement dissous par les acides forts (HCl, H ₂ SO ₄) mais facilement attaqué par les acides faibles, minéraux ou organiques (acétique, citrique ou tartrique) pour donner des sels solubles.

II.2.2.2 Utilisations et applications du plomb

L'enrichissement et l'extraction du plomb est très complexe, de nombreux processus et techniques sont utilisés pour cette fin : l'une d'entre elles est l'électrolyse qui permet de le dissoudre à l'anode et de le précipiter dans les cathodes et l'autre c'est la pyrométallurgie qui consiste à obtenir un plomb d'une pureté avoisinant les 99%.

En dépit de sa toxicité et de sa dangerosité pour l'environnement, le plomb reste toujours comme étant un métal essentiel pour les activités industrielles, ceci est dû à ses applications spécifiques qui sont très difficilement remplaçable par d'autres éléments, on peut citer certaines de ses applications dans ce qui suit :

- Il est utilisé dans les industries de verre à cause de ses bonnes propriétés de réfraction et aussi pour sa bonne absorption des rayons-X

- Il est aussi utilisé comme un métal vu sa grande capacité d'absorption des radiations; et par conséquent on l'utilise largement dans les industries nucléaires et aussi dans les hôpitaux et les laboratoires où d'énormes quantités de radiations sont émises afin de les absorber.

- Il est également utilisé comme un adjuvant pour les carburants et aussi pour les constructions automobiles

II.2.2.3 Toxicités du plomb

➤ sur l'humain

Les catégories les plus vulnérables sont les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées. Chez les enfants, l'intoxication se manifeste durant la croissance par une anémie, des troubles rénaux, une perte auditive et une diminution du quotient intellectuel (QI). Les principales sources d'exposition sont les poussières, l'écaillage des peintures contenant du plomb, ainsi que les jouets que les enfants portent à la bouche et sucent.

II.2.3 La pyrite

La pyrite est communément appelée « l'or du fou ». Bien que beaucoup plus léger que l'or, sa couleur cuivrée et sa densité relativement élevée ont induit en erreur de nombreux prospecteurs novices. Son nom est dérivé du mot grec pyr, qui signifie « feu », car il émet des étincelles lorsqu'il est frappé par le fer. Il est opaque et jaune pâle argenté lorsqu'il est frais, devenant plus foncé et ternissant avec une exposition à l'oxygène. Les cristaux de pyrite peuvent être des « pyritoèdres » cubiques, octaédriques ou à douze côtés et sont souvent striés. La pyrite peut également être massive ou granulaire, ou former des disques aplatis ou des nodules de cristaux allongés rayonnants. La pyrite se trouve dans les veines hydrothermales, par ségrégation à partir de magmas, en contact avec des roches métamorphiques et dans des roches sédimentaires, telles que le schiste et le charbon, où il peut soit remplir ou remplacer des fossiles. [50]



Figure II.3 : La pyrite

II.2.3.1 Caractérisation physico-chimique de pyrite

Tableau II.3 : Tableau Caractérisation physico-chimique de pyrite [50]

Classification chimique	Sulfure minéral
Composition chimique	FeS_2
Couleur	Réfléchissant jaune-laiton pâle; ternit plus foncé et irisé
Streak	Noir verdâtre à noir brunâtre
Lustre	Métallisé, brillant
Clivage	Pauvre / Indistinct Indistinct sur {001}.
Diaphaneity	Opaque
Dureté Mohs	6–6,5
Gravité spécifique	4.95–5.10
Crystal System	Isométrique
Ténacité	Fragile
Fracture	Irrégulière / Inégale, Conchoïdale
Densité	4,8 – 5 g / cm ³ (mesurée) 5,01 g / cm ³ (calculée)

II.2.3.2 Utilisations et applications de pyrite

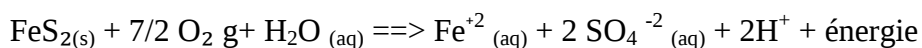
La pyrite a été utilisée à travers les âges dans de nombreux domaines, mais elle est principalement employée dans la bijouterie traditionnelle ainsi qu'en lithothérapie. Dans certains pays comme le Canada, elle est utilisée comme matériau de remblai pour les

fondations des constructions. Elle est également encore utilisée dans certaines industries, notamment pour la production d'or ou l'extraction d'autres minerais se formant dans les mêmes conditions. [50]

II.2.3.3 Réaction d'oxydation de la pyrite

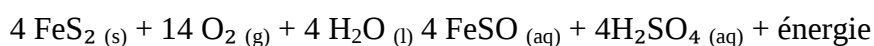
La réaction d'oxydation de la pyrite a été largement décrite par plusieurs auteurs. L'oxydation biotique a lieu en présence de microorganismes tandis que l'oxydation abiotique est définie comme l'oxydation chimique. De plus, l'oxydation biotique et abiotique peuvent être occasionnées par l'oxygène seulement (oxydation directe) ou par l'oxygène et le fer (oxydation indirecte).

Des réactions chimiques sont communément utilisées pour représenter ces mécanismes d'oxydation. Dans les processus d'oxydation directe abiotique et biotique, l'oxygène oxyde directement la pyrite :



Les équations chimiques suivantes décrivent les trois étapes de ce processus, telles que proposées par Ferguson et al. [21]

Étape 1:



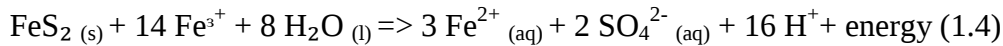
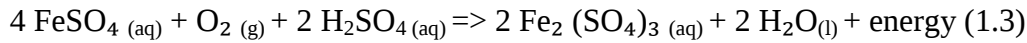
A un pH supérieur à 4,5, la pyrite est surtout directement et lentement oxydée par l'oxygène. Il y a ainsi formation de fer ferreux et d'acide sulfurique, ce qui occasionne une diminution du pH si aucun composé alcalin n'est présent dans le milieu.

Étape 2 :

Cette deuxième étape implique les mêmes réactions que l'étape 1, excepté qu'entre un pH de 3,5 et 4,5, le taux d'oxydation est accéléré par l'activité bactérienne et l'on observe une baisse de l'énergie d'activation du processus d'oxydation.

Étape 3 :

Par la suite, à un pH inférieur à 3,5, le fer ferreux est oxydé en fer ferrique. À partir de ce moment, le fer ferrique peut oxyder directement la pyrite.



L'oxydation de la pyrite par le fer ferrique génère du fer ferreux qui peut être réoxydé via la réaction 1.3. Ainsi, les réactions 1.3 et 1.4 permet l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique qui est à son tour transformé en fer ferreux. Théoriquement, le seul moyen de l'arrêter est d'augmenter le pH ou de couper l'apport d'oxygène. A un pH de 3, la réaction de d'oxydation de la pyrite par le fer ferrique (1.4) est de 10 à 100 fois plus rapide que l'oxydation directe par l'oxygène (réaction 1.2). L'abondance du fer ferrique est directement influencée par le pH. [21]

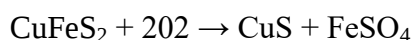
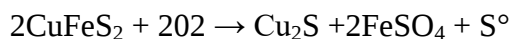
II.2.3.4 Processus d'oxydation des sulfures et effets sur la flottation

L'altération des minéraux sulfurés est un processus d'oxydation des sulfures en présence d'oxygène et d'eau. Elle est influencée par la présence des sulfures de fer (pyrite, marcassite, pyrrhotite) qui conduisent à la formation du sulfate ferrique ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) oxydant qui accélère la dégradation des autres sulfures difficilement oxydables (chalcopryrite par exemple). Les réactions qui interviennent sont les suivantes [22] :

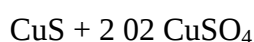
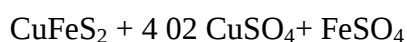
Marcasite et pyrite (altération facile)

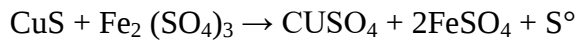
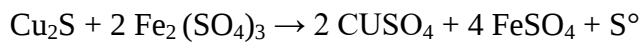
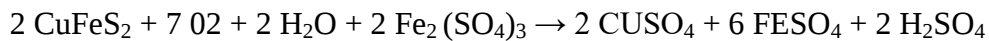


La chalcopryrite (altération difficile)



Une altération poussée de la chalcopryrite, la chalcosine et la covelline conduit à la formation de CuSO_4 .



Altération des sulfures avec participation du sulfate ferrique

L'altération des minerais sulfurés contenant de la pyrite conduit à la formation de sulfate de fer à la surface des minéraux de cuivre, de zinc,... qui les déprime lors de la flottation. Cette altération conduit également à la formation des couches superficielles des minéraux oxydés (azurite, malachite, smithsonite, cérussite,..) qui flottent plus difficilement que les sulfures avec les collecteurs sulfhydriques.

La flottation des minéraux sulfurés altérés nécessite une activation des grains et l'utilisation des collecteurs puissants. Cette activation peut être réalisée par le nettoyage de la surface en faisant une attrition des particules. Certains auteurs préconisent l'activation des sulfures de fer déprimés par la chaux ou le cyanure par l'utilisation de l'acide sulfurique. [23]

II.2.4 Le cuivre

Le cuivre est l'un des métaux les plus anciens découverts par l'Homme. Il est facilement reconnaissable par sa couleur rougeâtre à brune, en passant parfois par l'orangé. Le cuivre, au même titre que l'or, l'osmium ou le césium, fait partie du club fermé des métaux purs, et présentant une couleur autre que le gris ou l'argenté.

L'une des plus anciennes traces de cuivre date de 8 700 ans av. J.-C. L'objet en question était un pendentif. Il a été découvert dans le nord de ce qui est aujourd'hui l'Irak. Et si le cuivre est autant apprécié depuis toutes ces années, c'est pour sa grande polyvalence. [51]

II.2.4.1 Propriétés du cuivre

➤ Propriétés physique

Tableau II.4 : Tableau Propriétés physique du cuivre [51]

Propriété	Valeur (unités)
Densité	8.96 g / cm ³
Point de fusion	1085 ° C
Point d'ébullition	2927 ° C
Conductivité électrique	100% SIGC à 20°C
Conductivité thermique	400 W m ⁻¹ K ⁻¹
Résistivité électrique	1.72 × 10 ⁻⁸ Ω·m

➤ Propriétés chimiques du cuivre

Tableau II.5 : Tableau Propriétés chimique du cuivre [51]

Numéro atomique	29
Masse atomique	63,546 g.mol ⁻¹
Electronégativité de Pauling	1,9
Masse volumique	8,9 g.cm ⁻³ à 20°C
Température de Fusion	1083 °C
Température d'ébullition	2595 °C
Rayon atomique (Van der Waals)	0,128 nm
Rayon ionique	0,096 nm (+1) ; 0,069 nm (+3)
Isotopes	2
Configuration électronique	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
Energie de première ionisation	743,5 kJ.mol ⁻¹
Energie de deuxième ionisation	1946 kJ.mol ⁻¹
Potentiel standard	+ 0,522 V (Cu ⁺ / Cu) ; + 0,345 V (Cu ²⁺ / Cu)
Découverte	Connu dès la préhistoire.

II.2.4.2 Les types de minerais de cuivre

II.2.4.2.1. Sulfures

- ❖ La chalcopirite : CuFeS_2 : (Cu_2S , Fe_2S_3)



Figure II.4 : La chalcopirite.

La chalcopirite est une espèce minérale composée de sulfure double (35 % massique), de cuivre (34,5 %) et de fer (30,5 %), de formule CuFeS_2 . Avec des traces de Ag ; Au ; In ; TI ; Se ; Te.

- ❖ La Bornite : Cu_5FeS_4 : ($5\text{Cu}_2\text{S}$, Fe_2S_3)

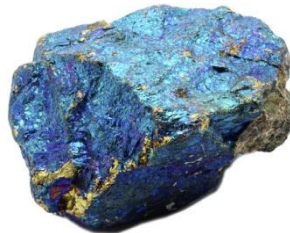


Figure II.5 : La Bornite.

- ❖ La covelline : CuS



Figure II.6 : La covelline.

❖ La chalcocite : Cu_2S



Figure II.7 : La chalcocite.

II.2.4.3 Utilisations du cuivre

Grâce à son large éventail de propriétés utiles, le cuivre est indispensable dans de nombreuses industries.

- Câblage électrique

La conductivité élevée du cuivre en fait le principal matériau utilisé pour le câblage électrique, tant dans le secteur résidentiel que dans le secteur industriel. Des réseaux électriques aux circuits domestiques, le cuivre est largement utilisé dans les télécommunications car son efficacité minimise les pertes d'énergie lors de la transmission.

- Plomberie

Les tuyaux en cuivre résistent à la corrosion, sont très durables et possèdent des propriétés antimicrobiennes ; c'est pourquoi ils trouvent des applications populaires dans les systèmes de plomberie. Le fait que le cuivre résiste à des températures et des pressions élevées le rend idéal pour les systèmes d'eau chaude et d'eau froide.

- Construction

Le cuivre est largement utilisé dans la construction, en particulier pour les travaux de couverture, et présente un meilleur attrait esthétique et une plus grande longévité. Le matériau de couverture en cuivre est durable et résistant à la corrosion, ce qui lui vaut d'être largement utilisé dans l'industrie du bâtiment, tant au niveau national qu'au niveau commercial. Le câblage en cuivre est également largement utilisé dans les systèmes électriques des bâtiments.

- Alliages

Dans les applications techniques, le cuivre est souvent allié à d'autres métaux pour produire des matériaux aux propriétés améliorées. Les alliages de cuivre tels que le laiton (alliage de cuivre et de zinc) et le bronze (alliage de cuivre et d'étain) ont de nombreuses applications, depuis les pièces de monnaie et les médailles jusqu'aux engrenages, aux valves et aux instruments de musique. L'ajout d'autres métaux au cuivre le renforce et lui confère généralement une résistance à la corrosion et un attrait esthétique.

- Monnaie

Le cuivre est traditionnellement utilisé pour la frappe des pièces de monnaie, et ses alliages sont encore utilisés de nos jours. Cependant, même avec la tendance actuelle à la numérisation de l'argent, le cuivre est toujours utilisé pour la frappe des pièces de monnaie en raison de sa malléabilité et de sa résistance à la corrosion. [51]

II.2.4.4 Impact de cuivre sur la santé et l'environnement

➤ Risques pour la santé humaine

Contrairement à d'autres métaux lourds, le cuivre est un oligo-élément essentiel pour l'homme. Mais un excès entraîne des effets toxiques.

Effets sur la santé Troubles digestifs :

- ✓ Nausées,
- ✓ Vomissements,
- ✓ Douleurs abdominales.
- **Foie** : atteintes hépatiques graves en cas d'exposition chronique.
- **Système nerveux** : désordres neurologiques à fortes doses.
- **Maladies spécifiques** : aggravation de pathologies comme la maladie de Wilson (accumulation anormale de cuivre dans l'organisme).

➤ Impacts environnementaux

La pollution cuivre perturbe fortement les écosystèmes :

- ✓ **Sols** : appauvrissement de la biodiversité microbienne, baisse de fertilité.
- ✓ **Plantes** : ralentissement de la croissance, jaunissement des feuilles, stress oxydatif.

- ✓ **Eau** : toxicité pour les poissons et organismes aquatiques sensibles.
- ✓ **Chaîne alimentaire** : bioaccumulation progressive dans certains invertébrés et poissons.

II.3 traitement par flottation des sulfures

Le principe de la flottation des minerais est le suivant : les particules solides sont mises en suspension par agitation dans de l'eau après qu'un broyage en humide, plus ou moins poussé, ait libéré de la gangue l'espèce minérale valorisable. Ce mélange solide-eau (ou pulpe) est conditionné avec un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface du minéral à flotter, afin de lui conférer une affinité plus grande pour la phase gazeuse que pour la phase liquide. On obtient une action sélective du collecteur en faisant appel à des modificateurs, les déprimants et les activateurs, qui modifient son affinité pour certaines surfaces minérales.

Il s'agit alors du procédé de flottation différentielle, permettant par exemple la séparation des sulfures, des oxydes, des silicates, des sels. La pulpe ainsi conditionnée est introduite dans des réacteurs munis d'agitateurs aérés (cellules de flottation) ou d'injecteurs d'air (colonne de flottation) ou d'électrodes (électro flottation) générant des bulles d'air et les dispersant. Les particules rendues hydrophobes se fixent à la surface des bulles qui constituent un vecteur de transport grâce à leur mouvement ascensionnel vers la surface libre de la pulpe. On obtient ainsi une mousse surnageante chargée en solides, appelée écume.

On peut donc définir plusieurs opérations élémentaires lors du processus de flottation :

- ✓ conditionnement des surfaces des solides par des modificateurs de l'adsorption du collecteur ;
- ✓ adsorption du collecteur sur la surface d'un solide déterminé ;
- ✓ contact entre les particules solides et les bulles d'air ;
- ✓ transport de l'ensemble bulles-particules vers la surface de la pulpe ;
- ✓ formation et récupération de l'écume.

Tableau II.6 : Les principaux minéraux pouvant être séparés par flottation

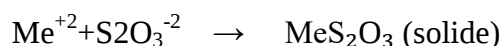
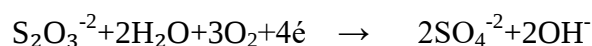
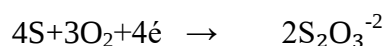
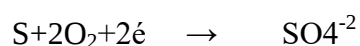
Nom du minerai de Sulfure	Minerai
Galène	PbS
Blende	ZnS
Marmatite	MoS ₂
Molybdénite	MoS
Pentlandite	Ni _{1-x} Fe _x S
Chalcocite	Cu ₂ S
Covellite	CuS
Chalcopyrite	CuFeS ₂
Bornite	Cu ₅ FeS ₄
Enargite	Cu ₃ AsS ₄
Tennantite	(Cu, Fe) 12As ₄ S ₁₃
Tétrahédrite	FeS ₂
Pyrite FeS ₂	FeS ₂
Pyrhotite	Fe _{1-x} S
Mispickel	FeAsS

II.3.1 Réactifs de flottation des sulfures

a- Propriétés des sulfures

Les propriétés fondamentales des sulfures, qui ont une influence prédominante sur leur comportement en flottation concernent :

- leur très grande insolubilité (les pKs des réactions $\text{MeS} \rightarrow \text{Me}^{2+} + \text{S}^{2-}$ sont de l'ordre de 20) ;
- leur instabilité en présence d'eau et d'air ; les réactions suivantes :

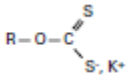
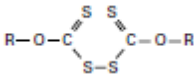
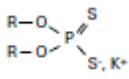
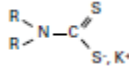
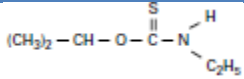
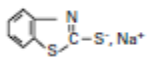


Sont toutes possibles et conduisent à envisager (suivant le pH, le type de sulfure et la solubilité des espèces MeS_2O_3 ou MeSO_4) une composition de surface des sulfures, après oxydation par l'oxygène dissous, comportant des espèces telles que soufre, thiosulfate, sulfate, hydroxyde. En raison de la présence de gaz carbonique dissous et en fonction de la solubilité relative des carbonates par rapport aux sulfates, thiosulfates, hydroxydes, etc., le composé de surface peut se transformer, par un mécanisme d'échange d'ions, en un carbonate de surface.

b-Principaux collecteurs des sulfures

Les collecteurs utilisés industriellement sont des substances anioniques appartenant à la famille des thiosels. Ces produits, très sélectifs, sont les xanthates et les dithiophosphates. L'adsorption des collecteurs sur les sulfures est basée sur la stabilité des sels méta-thiol. Plus la chaîne hydrocarbonée est longue, plus le complexe formé sur la surface est stable et plus la récupération des espèces est facile. Autrement dit, le phénomène de flottation résulterait d'une adsorption chimique du surfactant ioniques le revêtement collecteur le moins soluble, donc le plus stable donnant les meilleurs résultats en flottation.

Tableau II.7 : Principaux collecteurs des minéraux sulfurés (R = radical aliphatique)

Collecteurs	Formule	pH de mise en œuvre
Allkyldithiocarbonates (xanthate)		8-13
Dialkyldisulfures (dixanthogénr)		1-11
Dialkyldithiophosphates		4-12
Dialkyldithiocarbamate		5-12
Isopropylidithiocarbamate		4-9
Mercaptobenzothiazole		4-9

c-Régulateurs de milieu

Les régulateurs, ou bien modificateurs, du milieu sont utilisés de manière extensive dans la flottation dans le but de modifier l'action du collecteur, que ce soit pour intensifier ou bien pour diminuer l'e et de son imperméabilité sur la surface du minéral. Ainsi ils rendent l'action du collecteur plus sélective envers certains minéraux a n d'éliminer les ions indésirables. Les régulateurs du milieu peuvent être aussi classés comme étant des activant, déprimants ou bien des modificateurs du Ph [17]

d-Moussants

Les moussants sont ajoutés pour stabiliser la formation des bulles dans la pulpe, a n de créer une mousse raisonnablement stable pour permettre un drainage sélectif à partir de la mousse d'une gangue entretenue, et aussi pour augmenter la cinétique de la flottation.

L'importance de la phase moussante pour la performance de la flottation est en train d'être reconnu de plus en plus, et les facteurs affectant la stabilité de la mousse sont sujets à des recherches extensives.

Les moussants sont généralement des réactifs organiques hétéro-polaire aptes à l'adsorption sur l'interface gaz-liquide a n de faire remonter les particules du minerai utile dans les bulles d'air et laisser les autres retomber au fond de la cellule.

L'activité des moussants est ainsi due à l'aptitude de la mousse à adsorber sur l'interface gaz-liquide à cause de l'activité existante sur sa surface et aussi afin de réduire la tension superficielle, et donc stabiliser les bulles d'air. Le moussant doit aussi être soluble dans le but de réaliser une bonne distribution de celui-ci dans la solution aqueuse et ainsi pour rendre son activité très effective. [17]

e-Déprimants

Les déprimants ou bien dépresseurs sont des substances ayant grand rôle dans la flottation qui consiste à augmenter la sélectivité d'action des collecteurs par rapport aux minéraux à van-loriser, car les minéraux appartenant à une même classe sont flottés par un même collecteur. Ils assurent la dissolution de la couche du collecteur qui se trouve sur la surface du minéral à dépression et la création des conditions qui empêchent la formation d'une telle couche.

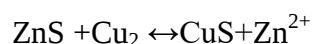
Ainsi le déprimant sert à annuler l'e et du collecteur sur certaines surfaces minérales précises, i.e. : à réduire le pourcentage de gangue se trouvant dans le concentré en le faisant plonger au fond de la pulpe pour qu'il ne remonte pas avec la mousse. Plusieurs types de déprimants existent, leurs actions sont complexes et variées et dans le plus grand des cas pas totalement comprises, ce qui rend la dépression plus difficile à contrôler que l'application d'autres types de réactifs, surtout quand la phase moussante est affectée par leurs action. [17]

f- Activant

Ce sont des réactifs chimiques qui altèrent la nature chimique des surfaces minérales afin de les rendre hydrophobes lors de leur contact avec les collecteurs. Les activant sont généralement des sels solubles qui n'ionisent dans une solution, et ces ions réagissent ensuite avec les surfaces des minéraux.

Dans le cas de notre projet de n d'étude, on réalise l'activation de la sphalérite (blende) par le cuivre car sa flottation ne peut être satisfaite à 100% juste par l'utilisation du xanthate comme collecteur. An d'améliorer notre flottation on peut augmenter la quantité du collecteur utilisé mais celle-ci ne peut qu'augmenter les dépenses et diminuer ainsi les profits de l'industrie elle-même. Donc la méthode la plus satisfaisante est celle de l'utilisation du sulfate de cuivre (CuSO_4) comme activant qui est déjà soluble et dissocié dans les ions de cuivre dans la solution.

L'activation est dû à la formation de molécules de sulfures de cuivre sur la surface du minéral car le cuivre a une électronégativité supérieure à celle du zinc et par conséquent s'ionise plus lentement selon cette équation :



Les sulfures de cuivre se déposent ainsi sur la surface de la sphalérite et réagissent avec le xanthate a n de former du xanthate de cuivre insoluble. Ceci tend à rendre la surface de la sphalérite hydrophobe.

L'utilisation des sulfates de cuivre comme activant est beaucoup plus destiné aux minéraux plombo-zincifère, car après la flottation du plomb, la sphalérite est activée et ainsi flottée. Les ions de cuivre peuvent aussi agir comme étant des activant de la galène, la calcite ainsi que la pyrite. Quand la sphalérite est associée avec la pyrite (mineral

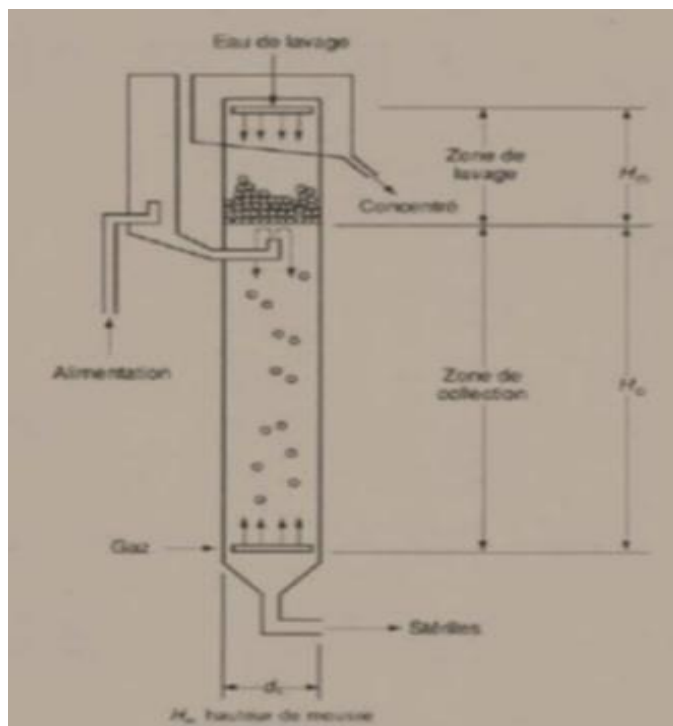
métallique sulfuré) la sélectivité est assurée par une alcalinité élevée (pH variant de 10.5 à 12) de la pulpe. [17]

II.4 Machines de flottation

II.4.1 Colonne de Flottation

La colonne de flottation a été réalisée par PierreBoutin et Rémi Tremblayau début des années 1960.

Ce dispositif est un simple tube avec une hauteur plus grande que l'aire de sa surface transversale. Il n'y a pas de partie mobile à l'intérieur de la colonne. On distingue deux zones différentes : la zone de collection et la zone d'écume. Ces zones se trouvent séparées par l'interface pulpe-écume, laquelle détermine la longueur de chacune d'elles. L'appareil ainsi défini travaille à contre-courant : la pulpe est introduite aux deux tiers environ de la hauteur de l'appareil. Au bas de la colonne est injecté l'air par le générateur des bulles, qui cheminent à contre-courant de la pulpe. À la partie supérieure, une aspersion d'eau assure le lavage des mousses recueillies.



Figures II.8 : Schéma d'une colonne de flottation

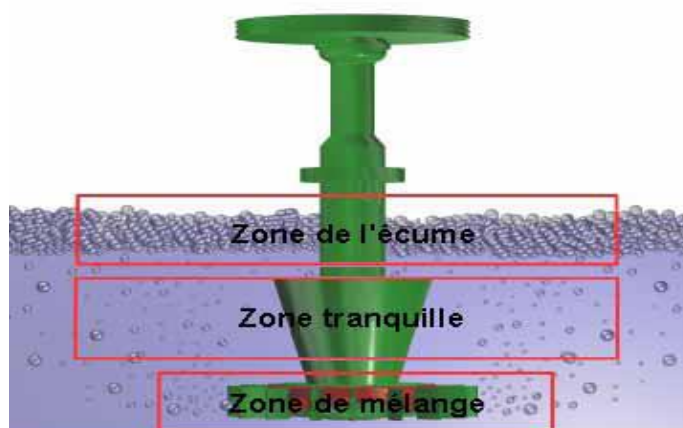
Elles se différencient de plus par leur contenu d'air (10 à 25% pour la zone de collection et supérieur à 60% pour la zone d'écume). Les colonnes industrielles ont souvent une hauteur de 9 à 15m et un diamètre de 0.5 à 3m. La zone de collection est approximativement de 75 à 90% de la longueur totale. Un système de génération de bulles d'air est inclus à la base de la colonne et un débit d'eau de lavage est additionné au sommet pour pouvoir effectuer un nettoyage de la mousse (concentré). [24]

II.4.2 Cellule de flottation

Les essais de flottation ont été réalisés dans une cellule de laboratoire de type DENVER, Elle se compose des dispositifs suivants :

- 1- Un agitateur.
- 2- Un dispositif permettant l'injection de l'air.
- 3- Une raclette.
- 4- Un bac pour la récupération de l'écume (mousse).

Couramment utilisée pour les processus primaires de séparation. Elle peut être le résultat d'un dégagement gazeux à partir d'une fermentation par exemple. C'est le cas avec l'écume dans les digesteurs qui peuvent contenir jusqu'à 20 à 40 % de solide en suspension (SS) même si leur densité est seulement de 0.7 ou 0.8 kg.l⁻¹. La flottation naturelle est améliorée si l'on injecte des bulles d'air dans la masse liquide. On utilise des aérateurs mécaniques en diffusant de fines bulles d'air afin d'éliminer les huiles. L'effet de transport de l'air dû aux bulles permet de pousser les particules à la surface du liquide dans le but de favoriser leur accumulation. [25]



Figures II.9 : Cellule de flottation Denver Sala type DR ouvert

II.5 Lixiviation chimique et bactérienne des sulfures et techniques d'extraction par solvant :

La lixiviation est l'art d'extraire les métaux de leurs minerais. Les minerais contiennent généralement les éléments métalliques à l'état oxydé. La majorité parmi eux sont des sulfures, des oxydes, des chlorures ou des carbonates. Cette technique est souvent utilisée pour des métaux lourds et précieux comme le cuivre, le zinc et l'uranium ; elle est basée sur des réactions chimiques visant à absorber spécifiquement la substance à extraire. Dans ce chapitre on va présenter une généralité sur la lixiviation.

II.5.1 Généralités sur la lixiviation

L'hydrométallurgie une méthode d'extraction des métaux commence par la lixiviation, qui est un procédé consistant en une mise en solution sélective d'un concentré ou d'un minerai par un solvant (acide ou base), l'objectif de cette opération est de dissoudre une grande quantité des métaux utiles. Le concassage et le broyage du gisement visent à libérer physiquement les minéraux nécessaires avant de les séparer des résidus par des procédés physiques et chimiques. Il s'effectue à sec, sert à simplifier le gisement en particules primitives.

Le broyage effectué pour obtenir des particules plus minces, se fait en milieu humide, parfois avec l'ajout de substances chimiques comme: le cyanure CN, le sodium Na..., dans le circuit de broyage.

II.5.2 Types de lixiviation

Les types de lixiviation sont classés suivant les agents lixivants utilisés. On distingue

II.5.2.1 Lixiviation chimique

La lixiviation permet de extraire des éléments constitutifs de minéraux en faisant passer une solution aqueuse à travers le sol permettant la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Cette technique est couramment utilisée dans le secteur minier pour récupérer des métaux de valeur (argent, or, cuivre, uranium, zinc,...) à partir de matériaux géologiques. [26]

La lixiviation est une réaction de formation de complexes entre les éléments des lixivants de la solution et le métal contenu dans la roche. C'est une réaction lente limitée par la distribution des réactifs dans le solide et des produits de réaction dans la solution.

A. Lixiviation acide

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais à gangue acide, le milieu solvant est constitué de l'acide. On distingue dans cette catégorie:

➤ **Lixiviation acide et oxydante:**

Il y a lixiviation oxydante lorsqu'il y a montée d'état d'oxydation de l'élément dans la solution que dans le solide. Ce type de lixiviation s'applique aux minerais mixtes (oxyde et sulfures). L'acide sulfurique est le solvant le plus utilisé. Les conditions oxydantes peuvent être réalisées par l'air (oxygène) ou par les ions ferriques présents (provenant des minerais ou ajoutés intentionnellement).

➤ **Lixiviation acide et réductrice:**

Dans ce type de lixiviation, la solution lixiviante est rendu réductrice par un agent réducteur tels que le SO, le fer ferreux, le NO. La réduction permet la dissolution des oxydes tels que MnO, et CO₂O, qui ne sont pas soluble dans H₂SO₄ dilue. [26]

B. Lixiviation ammoniacale

La lixiviation ammoniacale est utilisée pour les minerais à gangue dolomitique (CaO, MgO) qui se prêtent mal à une attaque acide. Pour les minerais sulfurés, la lixiviation ammoniacale se fait en présence d'oxygène comme agent lixiviation.

C. Lixiviation par cyanuration

Ce type de lixiviation est appliqué essentiellement au traitement des métaux précieux. On utilise une solution diluée de cyanure de potassium (KCN) en milieu basique pour éviter l'hydrolyse du cyanure.

D. Lixiviation par les chlorures

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais sulfurés mais l'utilisation de l'acide chlorhydrique est exclue compte tenu de son prix qui est élevé, cependant on emploie une solution acide de FeCl

E. Lixiviation par la soude caustique

Cette lixiviation est pour dissoudre des oxydes tels que la bauxite.

II.5.2.2 Lixiviation bactérienne

Elle est utilisée pour la mise en solution des minerais sulfurés, pauvres et complexes. Les microorganismes comme les Thio Bacillus et les feroobacillus possèdent des propriétés catalytiques permettant d'augmenter la cinétique de lixiviation. [26]

A. La biolixiviation

La biolixiviation (appelée aussi lixiviation biologique ou lixiviation bactérienne) est une technique d'extraction de métaux à grands intérêt économiques d'une roche, mettant en jeu des micro-organismes capables de convertir ces métaux de la forme solide à la forme soluble, qui pourront ensuite être extraits. Ces processus peuvent être dissociés dans les eaux des sites à déshydratation minière acide (bactéries mésophiles) ou des sources hydrothermales (bactéries thermophiles).

Cette technique est naturelle, économique et importante sur le plan environnemental. Elle s'effectue à des températures et pressions faibles avec une vitesse de réaction lente, mais leur inconvénient est l'obtention dissolutions diluées. [26]

B. La biosorption

La biosorption est utilisé pour décrire tous les processus reliés à la récupération des métaux en présence des absorbants, qui sont des cellules vivantes ou morte. La biosorption se fait avec des bactéries actives lorsque les interactions métaux-bactéries se fait avec des cellules vivantes (précipitations, oxydation-réduction), passive, lorsque les métaux sont transformé suite à des réactions physico-chimiques (complexation par des substances produites par les cellules, absorption du métal sur la paroi cellulaire).

C. La précipitation

Le processus se fait sous des conditions anaérobies (qui se déroule en l'absence de l'oxygène) et performe une oxydation compléter des sulfures à l'aide des bactéries sulfato-réducteur.

II.5.2.2.1 Mécanismes de la lixiviation bactérienne

Plusieurs mécanismes sont proposés dans la littérature sans que tous les autres soient en accord. Les mécanismes les plus décrits dans la littérature sont les mécanismes direct et indirect. Ce dernier par la production de l'agent oxydant chimique le Fe^{+3} . Trois mécanismes par lesquels les microorganismes pourraient être en interaction avec un minéral sulfuré :

A. Le mécanisme de contact direct

Les bactéries en contact avec le minéral sulfuré oxydent la phase sulfurée en sulfate par des moyens biologiques directs sans exiger la présence d'ions ferriques ou ferreux.



La réaction se passe donc à l'interface entre le solide et la phase aqueuse où sont inoculées les bactéries. La réaction se passe par contact de la bactérie avec le minéral sulfuré solide de sorte que la cinétique dépend de la surface spécifique du minéral et des produits qui se forment en surface, qui tendent souvent à gêner ce contact. Le soufre qui se forme par l'équation chimique a tendance à passiver les particules solides et arrêter la dissolution des sulfures. Il est éliminé en surface par oxydation catalysée par les bactéries selon la réaction :



B. Le mécanisme indirect

Les bactéries oxydent les ions ferreux en ions ferrique et les ions ferriques oxydent ensuite le minéral sulfuré. La réaction principale de dissolution des sulfures métalliques est une réaction chimique entre le fer ferrique et les sulfures :



La bactérie régénère constamment le fer ferrique en solution par la réaction catalytique et le soufre formé par la réaction est, comme dans le premier mécanisme, oxydé par la bactérie en acide sulfurique. [26]

II.5.3 Extraction liquide-liquide

Les opérations d'extraction comptent parmi les méthodes les plus utilisées en analyse chimique pour séparer les constituants d'un mélange.

Elles reposent sur la différence de solubilité (ou d'affinité) d'une substance donnée entre deux phases non miscibles.

➤ Principe physico-chimique :

L'extraction liquide-liquide est basée sur la différence d'affinité d'un soluté entre deux phases liquides non miscibles :

- ✓ une phase aqueuse
- ✓ une phase organique

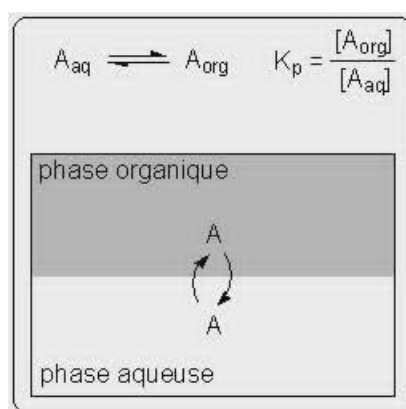


Figure II.10 : Équilibre de partage d'un soluté A entre deux phases liquides non-miscibles (aqueuse et organique)

Lorsque le soluté A est mis en contact avec ces deux phases, un équilibre de distribution s'établit entre elles : une partie du soluté passe dans la phase organique tandis que l'autre reste dans la phase aqueuse. [26]

Cet équilibre est décrit par le coefficient de partage :

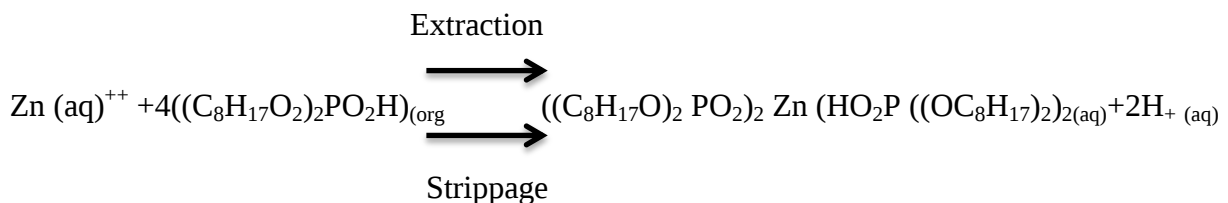
$$K_p = \frac{[A]_{org}}{[A]_{aq}}$$

Où :

- ✓ [A]org : Concentration du soluté dans la phase organique
- ✓ [A]aq : concentration du soluté dans la phase aqueuse

II.5.3.1 Extraction par solvant du zinc

Le zinc forme des complexes stables avec les extractions organophosphoriques qui sont des dérivés de l'acide phosphorique. Le plus commercialisé est le di (2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA). L'équilibre d'extraction-strippage est représenté par :



Le complexe est stable aux pH supérieurs à 2,5. Un problème qui limite l'utilisation de ces extrants acides est leur sélectivité limitée pour plusieurs métaux et leur forte affinité pour l'extraction du Fe^{3+} . L'extraction du Zinc exige l'élimination au préalable de ces ions en solution. Pour améliorer sa sélectivité, le D2EHPA est parfois utilisé en mélange avec le TBP (Tri-Butyl phosphate) qui modifie ses propriétés.

A notre connaissance, il n'existe pas encore d'usine utilisant l'extraction par solvant du zinc avec le D2EHPA. Par contre, cette extraction est très développée pour la purification de solutions, comme c'est le cas pour le cobalt à Kasere Cobalt en Ouganda, Mopani Copper Mines, Chambishi Métal Plc en Zambie et Knightsbridge Cobalt en Afrique du Sud.

La lixiviation des sulfures est plus difficile que celle des oxydes. Pour cette raison, la métallurgie classique commence par un grillage qui transforme les sulfures en sulfates ou oxydes. Deux inconvénients majeurs de cette technique sont d'ordre économique lorsqu'il s'agit d'un minerai ou concentré pauvre, et d'ordre environnemental car les gaz contiennent du SO_2 et parfois de l'arsenic polluant pour l'atmosphère.

Des problèmes peuvent se présenter suite à la formation de produits insolubles tels que le soufre, les polysulfures, les jarosites sur les particules minérales qui tendent à bloquer la lixiviation. Pour éviter la passivation par le soufre, ce dernier est oxydé par le soufre, ce dernier est oxydé pressions élevées. Dans les procédés qui utilisent la lixiviation bactérienne,

L'élimination du soufre de la surface minérale est effectuée par son oxydation en ions sulfates par l'usage des bactéries. Comparée aux autres techniques effectuées en milieu sulfate, la biolixiviation des sulfures utilise la capacité de certaines bactéries à oxyder les minéraux sulfurés suivant un mécanisme de contact direct ou un mécanisme indirect lequel se caractérise par la régénération constante de fer ferrique dans le milieu réactionnel et la solubilisation des sulfures par l'action chimique du Fe^{3+} sur les sulfures. Les bactéries les plus employées jusqu'à récemment sont les bactéries acidophiles mésophiles opérant à moins de 40°C. [9]

II.6 Effluent

II.6.1 Définition

Un effluent désigne le fluide résiduaire d'origine industrielle, issu du secteur de l'agroalimentaire, de la chimie et pétrochimie, de la métallurgie, du secteur pharmaceutique ou cosmétique, mais aussi de l'industrie minière de l'aéronautique, automobile ou du transport ferroviaire. Pour les rejets domestiques, l'épuration des eaux usées est nécessaire. Mais l'extrême diversité des eaux résiduaires industrielles (ERI) nécessite une intervention propre à chaque type d'industrie via des procédés spécifiques.

II.6.2 Les différents types d'effluents

Quatre grandes catégories de rejet peuvent être distinguées dans l'industrie :

- Les effluents de fabrication :

La plupart des procédés industriels engendrent des rejets polluants qui proviennent du contact de l'eau avec des gaz, liquides ou solides. Ces rejets sont soit continus, soit discontinus. La présence de bassins d'homogénéisation est donc indispensable.

- Les effluents particuliers :

Certains effluents sont susceptibles d'être ségrégés afin de subir un traitement spécifique. La récupération de matières premières et/ou d'eau en fabrication est alors possible. Dans un second cas, ces effluents sont dirigés vers un bassin de stockage pour être réinjectés à débit pondéré dans le circuit de traitement, après avoir subi au besoin un prétraitement. C'est le cas des bains de décapage et galvanoplastie ; soudes usées ; eaux ammoniacales de cokerie ;

condensats de papeterie, « eaux mères » des industries agroalimentaires et chimiques ; rejets toxiques et rejets concentrés.

- Les effluents des machines :

Ce sont les fluides qui découlent des cuves et tuyauteries comme les eaux de vannes, les eaux de chaufferie comme les purges de chaudière ou de réfrigération, ou encore les boues du traitement des eaux d'appoint.

- Les rejets occasionnels :

Il s'agit de tout fluide qui survient suite à une fuite accidentelle de produits lors de la manutention ou du stockage des eaux de lavage de sols ou d'outils de production par exemple ; mais aussi des eaux polluées. [52]

II.7 Définition d'un toxique

Un toxique est une substance capable de donner, plus ou moins rapidement, une incapacité plus ou moins poussée, une maladie ou la mort. La définition tient compte de toutes les formes d'intoxication (suraiguë, aiguë, chronique, subaiguë, subchronique...), de toutes les voies de pénétration (digestive, respiratoire, cutanée, oculaire), de toutes les substances (même l'eau et l'oxygène peuvent devenir toxiques à haute dose) et de tous les modes d'intoxication. [27]

II.7.1 Les forme d'intoxication

Selon que l'on distingue la rapidité d'apparition des symptômes, leur sévérité, leur durée ou la rapidité d'absorption de la substance toxique, nous avons affaire à des intoxications suraiguës, aiguës, subaiguës, subchroniques ou chroniques. Lors d'études de la toxicité d'une substance chimique, d'un point de vue opérationnel :

- **Toxicité suraiguë** : l'intoxication suraiguë correspond à une exposition de très courte durée. L'absorption est toujours très rapide, la dose toujours unique et la mort survient rapidement.
- **Toxicité aiguë** : administration unique du toxique. L'apparition de la toxicité est de courte durée. L'absorption du toxique et les manifestations d'intoxication sont rapides.

- **Toxicité subaiguë** : toxicité réitérée pendant au maximum 28 jours. L'intoxication subaiguë correspond à des expositions fréquentes et répétées sur une période de plusieurs jours ou semaines pour que les symptômes d'intoxication apparaissent.
- **Toxicité subchronique** : toxicité réitérée pendant plus de 28 jours et moins de 90 jours.
- **Toxicité chronique** : toxicité réitérée pendant plus de 90 jours. Dans le cas d'une intoxication chronique, les expositions sont répétées sur de longues périodes, la manifestation de l'intoxication dépend soit du poison qui s'accumule, soit des effets engendrés qui s'additionnent. [9]

II.7.2 Comment évaluer un effet toxique

L'évaluation de la toxicité s'appuie sur des études qualitatives (non mesurables) ou quantitatives (mesurables) adéquates. Il existe plusieurs types d'études qui nous permettent d'évaluer les effets d'un toxique. On peut les classer dans quatre catégories :

- les études épidémiologiques, qui comparent plusieurs groupes d'individus ou les études de cas ;
- les études expérimentales *in vivo*, qui utilisent des animaux (ex. : lapin, rat et souris) ;
- les études *in vitro*, effectuées sur des cultures de tissus ou des cellules ;
- les études théoriques par modélisation (ex. : structure-activité). [10]

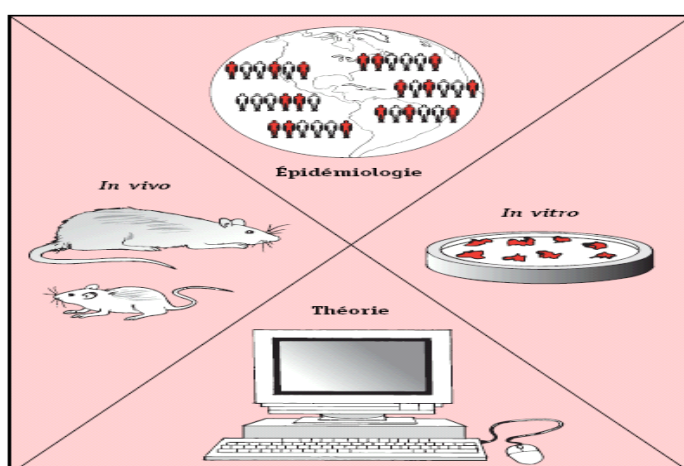


Figure II.11 : Les différents types d'étude

On utilise fréquemment une terminologie pratique mais arbitraire pour désigner les diverses formes d'intoxication selon la fréquence et la durée de l'exposition. [10]

Tableau II.8 : Les formes d'intoxication

Forme d'intoxication	Fréquence d'administration	Durée de l'exposition
aigüe	Unique	<24 heures
subaiguë	Répétée	≤1 mois
subchronique	Répétée	De 1 à 3 mois
chronique	Répétée	>3 mois

II.7.3 L'effets des activités minières sur les eaux

L'impact est également qualitatif en raison de l'usage de produits chimiques dans les phases de forage, d'extraction puis de concentration des minerais. Une mine exploitée est les voies de contact entre le minerai et l'eau ou l'oxygène offrant des conditions oxydantes aux minerais ciblés par les permis en cours qui sont des sulfures. Que ce soit en fond de mine par lessivage sur les parois ou en percolation sur les matériaux stockés en extérieur, ce phénomène d'oxydation s'auto-entretient et s'amplifie tant qu'il y a des sulfures exposés à l'air et à l'eau. S'en suivent des écoulements acides, les drainages miniers acides (DMA), qui sont une source de pollution acide et métallique (métaux lourds) pour les milieux aquatiques.

Les eaux acides peuvent entraîner une mortalité importante, des perturbations de la croissance, de la reproduction et des dommages chroniques aux organes et aux tissus. Ainsi, à titre d'exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont particulièrement toxiques en milieu acide et agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues.

Le minerai recherché est extrait par broyage de la roche et concentration chimique. De nombreuses études pointent que l'efficacité des équipements de forage nécessite l'injection de boues lubrifiantes, dont la composition ne se résume pas à de l'argile et de l'eau. Les mélanges utilisés font appel à des matières argileuses spécifiques mais aussi des additifs de synthèse : fluidifiants, plastifiants, antiagglomérants... Ces composés se disperseront inévitablement dans l'environnement est le contaminées. [53]

II.8 Conclusion

Au terme de ce chapitre, il apparaît que le traitement des minerais sulfurés constitue une étape fondamentale dans la valorisation des métaux de base tels que le zinc, le plomb et le cuivre. Ces métaux, bien que largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels, se présentent généralement sous forme de minerais complexes associés à des minéraux sulfurés, ce qui rend leur extraction et leur séparation particulièrement exigeantes sur le plan technique. L'étude des propriétés physico-chimiques de ces éléments, ainsi que celle des minéraux associés comme la pyrite, permet de mieux comprendre leur comportement au cours des différentes étapes de traitement.

L'ensemble de ces techniques met en évidence l'importance d'une maîtrise rigoureuse des paramètres opératoires afin d'optimiser le rendement et la qualité des concentrés obtenus. Enfin, l'aspect environnemental occupe une place centrale dans ce travail, notamment à travers la gestion des effluents issus des activités minières. Ces rejets, s'ils ne sont pas correctement traités, peuvent avoir des impacts significatifs sur les ressources en eau et les écosystèmes. Ainsi, la prise en compte des dimensions sanitaires et environnementales s'avère indispensable dans toute démarche d'exploitation minière durable. En définitive, ce chapitre met en évidence l'interdépendance entre les aspects minéralogiques, technologiques et environnementaux, soulignant la nécessité d'une approche intégrée pour une exploitation efficace et responsable des ressources métalliques.

Chapitre III:

Caractérisation des

résidus miniers de

Chaâbet El Hamra

III.1 Introduction

La caractérisation des résidus miniers constitue une étape fondamentale et incontournable dans toute démarche de valorisation [2]. Elle consiste à déterminer, de manière aussi précise et complète que possible, l'ensemble des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales des matériaux étudiés. Sans cette connaissance approfondie, il serait impossible de concevoir des procédés de traitement efficaces, de prédire le comportement des résidus dans l'environnement, ou d'évaluer le potentiel économique réel de leur retraitement [28].

Dans le cas spécifique des résidus miniers de Châabet -El-Hamra, la caractérisation revêt une importance particulière en raison de la complexité de ces matériaux. En effet, ces résidus résultent de plusieurs décennies d'exploitation et de traitement, au cours desquelles les techniques utilisées ont évolué, les zones exploitées ont varié, et les conditions de stockage ont pu modifier les propriétés initiales des rejets par des phénomènes d'altération, d'oxydation et de lessivage naturels [29].

Ce chapitre présente de manière détaillée les différentes techniques de caractérisation mises en œuvre, les résultats obtenus et leur interprétation, en suivant une progression logique allant de l'échelle macroscopique (propriétés physiques, granulométrie) vers l'échelle microscopique et atomique (minéralogie, composition chimique élémentaire, spéciation des éléments).

III.2 Pratiques de Reference Sur La Caractérisation Des Résidus Miniers

Les résidus miniers sulfurés sont des déchets solides générés lors des opérations d'exploitation et de traitement des minerais sulfurés, notamment ceux contenant la pyrite (FeS_2), la chalcopryrite (CuFeS_2) et la sphalérite (ZnS). Ces résidus sont généralement stockés sous forme de digues ou de bassins, où ils sont exposés aux conditions atmosphériques, ce qui favorise leur altération physico-chimique.

Le principal problème environnemental lié à ces résidus est la formation du drainage minier acide (DMA), résultant de l'oxydation des sulfures en présence d'eau et d'oxygène. Cette réaction produit de l'acide sulfurique, entraînant une baisse du pH et la mobilisation des métaux lourds vers les milieux environnants.

Plusieurs techniques analytiques sont utilisées pour caractériser ces résidus, notamment la diffraction des rayons X (DRX) pour identifier les phases minérales, la fluorescence X (XRF) pour quantifier les éléments majeurs, ainsi que les méthodes ICP pour analyser les éléments traces. [30]

III.3 Méthodologie de caractérisation

La méthodologie adoptée repose sur une approche expérimentale structurée comprenant trois étapes principales : l'échantillonnage sur site, la préparation des échantillons et leur analyse en laboratoire. Cette démarche vise à obtenir une caractérisation complète des propriétés physiques, minéralogiques, chimiques et environnementales des résidus étudiés. [31]

III.3.1 Stratégie D'échantillonnage Sur Site

III.3.1.1 Un Echantillonnage De Surface

Des échantillons ont été prélevés à la surface du dépôt afin de caractériser les zones les plus exposées à l'oxydation. Ces zones sont généralement riches en produits secondaires d'altération. [2]

III.3.1.2 Un Echantillonnage En Profondeur

Des prélèvements ont été réalisés à différentes profondeurs afin d'analyser la variation verticale des propriétés géochimiques et identifier les zones oxydées et non oxydées. [2]

III.3.1.3 Un Echantillonnage Des Eaux Et Des Sols Environnants

Des échantillons d'eau et de sols ont été collectés autour du site pour évaluer la dispersion des contaminants et l'impact environnemental des résidus. [2]

III.3.2 Préparation Des Echantillons Pour Analyses

Une fois le prélèvement réalisé, une étape de préparation des échantillons (avant toute analyse) est nécessaire pour éviter les biais de contamination ou d'hétérogénéité.

III.3.2.1 Le séchage

En ce qui concerne Le séchage à l'air libre consiste à exposer les échantillons prélevés à l'environnement ambiant pour d'éliminer l'humidité qu'ils contiennent. Les échantillons ont été placés dans un endroit fermé bien aéré (laboratoire de génie minier), à l'abri des intempéries. Les échantillons ont été étalés sur des surfaces propres et non contaminées, telles que des plateaux ou des bâches, en veillant à les espacer afin de permettre une meilleure circulation de l'air. La durée de séchage nécessaire est d'environ 48 heures afin d'assurer un séchage complet des échantillons.

III.3.2.2 Homogénéisation

Après réduction de la taille de l'échantillon, une opération d'homogénéisation a été réalisée en le plaçant sur de grandes bâches ou sacs de forme parallélépipédique très mince, tout en le mélangeant soigneusement pendant une durée déterminée d'environ 20 minutes, afin d'obtenir une répartition homogène des constituants de l'échantillon.

III.3.2.3 Broyage et pulvérisation

Un broyage mécanique a été effectué pour obtenir une granulométrie fine ($<75 \mu\text{m}$), nécessaire pour les analyses chimiques et minéralogiques.

III.3.2.4 Quartage

Le quartage est un mode de prélèvement d'une masse déterminée à partir d'une grande quantité de minerai. A chaque opération de quartage l'échantillon est réduit de moitié, Il peut être réduit de n fois en respectant les inégalités suivantes:

$$Q > Kd$$

$$m < Q/Kd^2$$

$$m = 2^n$$

$$(K=0,1)$$

Avec

Q : masse initiale

d: diamètre initial du plus gros grains n: nombre de quartage

K: coefficient de répartition de la minéralisation m: masse obtenue après quartage

III.3.2.5 Séparation granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains appelées fractions granulométriques constituant les échantillons. Ces fractions sont constituées de particules dont la grosseur couvre un intervalle relativement restreint et diminue d'une fraction à l'autre.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse granulométrique Parmi ces méthodes, la méthode de tamisage éventuellement utilisée dans notre présente étude permettra la récupération d'échantillons séparés en fonction de la taille des particules, en utilisant des tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures décroît du haut vers le bas, ensuite le classement des grains s'obtient par une combinaison des mouvements vibratoires horizontaux et des secousses verticales de cette tamiseuse. [32]

III.3.3 Caractérisation Physique Et Minéralogique

III.3.3.1 Analyse Granulométrique

Permet de déterminer la distribution de la granulométrie selon la dimension dans un échantillon donné. Cela se fait à l'aide de tamis mis en série sur une tamiseuse dans un ordre croissant du bas vers le haut, avec un rapport d'ouverture entre deux tamis consécutifs de racine carré de 2 ($\sqrt{2}$). Le choix du premier tamis se fait de telle sorte que le pourcentage des refus soit inférieur de 5% de la quantité globale.

➤ Matériels et méthode :

Echantillon de 600g des rejets de Châabet-El-Hamra a été prélevé de la digue Il a été séché à l'étuve à une température de 70° à 80°C pour éliminer l'humidité. L'analyse granulométrique a été effectuée au moyen d'une série de tamis de dimensions des mailles comprises entre 4 mm et 0,045 mm [9]

III.3.3.2 Détermination De La Densité Réelle

La masse volumique apparente (ρ_{app}) et la masse volumique réelle ($\rho_{réelle}$) des résidus ont été déterminées respectivement par :

- **Méthode du cylindre** (densitomètre à sable) pour la masse volumique apparente in situ
- **Pycnomètre à hélium** ou **pycnomètre à eau** pour la masse volumique réelle (norme NF P 94-054)

III.3.3.3 Diffraction Des Rayons X (DRX)

Une technique qualitative semi-quantitative qui permet d'identifier la composition minérale en se basant sur la structure cristalline des minéraux d'un échantillon.

Après que les Rayons X aient traversé la matière, ils se retrouvent déviés de leur trajectoire sans perte d'énergie mais avec changement de la longueur d'onde, ce phénomène est appelé effet Compton.

L'échantillon est mis en poudre fine. Puis, introduit dans un diffractomètre qui comprend un tube de rayon X pouvant effectuer des rotations de 0 à 90° grâce à un goniomètre. Cette technique est basée sur la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d\sin(\theta)$$

DRX Tel que :

d : distance interréticulaire , c'est-à-dire la distance entre deux plans cristallographiques (cm).

θ : demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre la direction du faisceau incident et celle du détecteur).

n : ordre de diffraction ($n=1,2,3\dots$).

λ : longueur d'onde des rayons X (nm).

Le résultat est présenté sous forme de spectre de l'intensité en fonction de 2θ dit diffractogramme. Ainsi, la hauteur des pics représente l'espacement entre les plans (d). Leur position permet de déterminer les structures ou phases cristallines ce qui a pour objet de connaître la composition cristallographique des éléments présents dans l'échantillon. [35] L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée sur l'échantillon à l'aide d'un diffractomètre Bruker D8

Tableau III.1: Composition minéralogique de la digue de Chaâbet-El-Hamra (Sétif)

Classes	Minéraux principaux	Minéraux accessoires
Sulfures	Bronite	Arsénopyrite
	Covelline	Digénite Cu_2S
	Chalcopyrite	Tennantite $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
	Galène	Réniérite
	Marcassite	Tétraédrite $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
	Pyrite	
	Sphalérite	
Carbonates	Calcite	Malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
	Dolomite	
Oxydes	Chlorite $(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$	Goethite FeOOH
	Muscovite $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	
	Quartz	

III.3.3.4 Analyse D'image Automatisée (Minéral Libration Analyses – MLA)

Pour une quantification minéralogique précise et l'évaluation des degrés de libération, une analyse par MLA (FEI MLA 650) a été réalisée sur les fractions granulométriques représentatives. Cette technique combine la microscopie électronique à balayage avec l'analyse d'image automatisée et la microanalyse EDS pour identifier et quantifier les phases minérales présentes, et déterminer leur degré de libération et leurs associations. Les résultats sont exprimés en pourcentage massique, en pourcentage surfacique, et en termes de libération (libre, binaire, ternaire, etc.).

III.3.3.5 Microscopie Electronique A Balayage (MEB-EDS)

Entre sulfures et gangue, nécessitant un broyage plus fin pour améliorer la libération. Le microscope électronique à balayage couplé à la spectroscopie dispersive en énergie (MEB-EDS) permet d'observer la morphologie, la texture et les associations minérales à l'échelle micrométrique, ainsi que de réaliser des analyses chimiques ponctuelles semi-quantitatives.

Les observations MEB des résidus de Chaâbet El Hamra révèlent :

1. **Des grains de sphalérite partiellement libérés** : certains grains de sphalérite sont libres (fully liberated), tandis que d'autres sont inclus dans la matrice carbonatée (locked particles), ce qui explique les pertes de récupération lors du traitement initial.
2. **Des bordures d'oxydation** autour des grains de pyrite : formation de couronnes de goëthite (FeOOH) et de jarosite autour des cœurs de pyrite intacts, témoignant de l'oxydation progressive des sulfures.
3. **Des associations galène-cérusite-anglésite** : la galène est fréquemment entourée de bordures de cérusite (PbCO_3) et/ou d'anglésite (PbSO_4), produits d'altération supergène.
4. **Des précipités secondaires de zinc** : smithsonite (ZnCO_3), hémimorphite, et hydroxydes de zinc amorphes sont observés comme produits d'altération de la sphalérite.
5. **Des particules de texture complexe** montrant des intergrowths (imbrications)

III.3.4 Caractérisation Chimique

III.3.4.1 Analyse Chimique Totale

Les analyses chimiques des rejets miniers ont été réalisées par spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) et par spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage inductif (ICP-OES).

Concernant la technique XRF, les échantillons solides ont été broyés à une granulométrie de $63\ \mu\text{m}$ puis préparés pour l'analyse afin de déterminer la composition chimique des éléments majeurs et traces. Cette méthode repose sur la mesure des rayons X fluorescents émis par l'échantillon lorsqu'il est soumis à une excitation appropriée, permettant ainsi la détermination des concentrations élémentaires de manière non destructive.

Pour la technique ICP-OES, l'échantillon est transformé en aérosol (nébulisation) au sein d'un plasma d'argon maintenu par induction électromagnétique. La concentration des éléments est ensuite déterminée par la mesure de l'intensité du rayonnement émis à une longueur d'onde spécifique à chaque élément. La préparation des échantillons constitue une étape essentielle dans l'analyse chimique des matériaux solides, car des résultats fiables ne peuvent être obtenus, même avec des instruments très précis, si cette étape n'est pas

correctement réalisée. Dans cette étude, des protocoles de préparation appropriés ont été appliqués afin d'assurer une représentation fidèle de la composition élémentaire des échantillons. [30]

III.3.4.2 Fluorescence X (XRF)

Il s'agit d'une technique non destructrice permettant de quantifier les compositions élémentaires des matériaux.

L'échantillon est soumis à un rayonnement de faible longueur d'onde et donc de forte énergie, comme les rayons X, les atomes constituant le matériau subissent une ionisation, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés des couches électroniques de chacun de ces atomes. Le spectre du matériau analysé est l'intensité du rayonnement en fonction de l'énergie, exprimée en général en électronvolts (eV) ou en longueur d'onde.

III.3.4.3 ICP-OES et ICP-MS

Les techniques ICP-OES et ICP-MS sont utilisées pour l'analyse des éléments traces avec une très haute précision. Ces techniques reposent sur l'ionisation de l'échantillon dans un plasma à haute température, puis sur la mesure du rayonnement émis ou de la masse atomique des éléments. [49]

- ICP-OES → pour les éléments à concentration moyenne
- ICP-MS → pour les éléments à très faible concentration (ppm – ppb) Ces méthodes sont utilisées pour la détermination des métaux lourds dans les eaux et les déchets.

III.3.4.4 Analyse Du Soufre Et Du Carbone

Une grande variété de minéraux et de composés de soufre et de carbone est souvent associée aux gisements de minerai. Ces minéraux peuvent avoir un impact sur le traitement du minerai et sur la manière dont les déchets peuvent être stockés pendant l'exploitation minière. L'identification des minéraux dans lesquels ces éléments sont présents a des implications importantes pour la caractérisation des déchets et du minerai.

- **Méthodes d'analyse du soufre**

Les sulfures et les sulfates constituent les minéraux dominants qui hébergent le soufre. La distinction de la proportion de chaque type de minéraux est souvent une partie importante de

la caractérisation environnementale et métallurgique du minerai et des déchets rocheux. Les sulfates ne produisent pas d'acide lors de la dégradation dans des conditions de surface, tandis que les sulfures se forment dans les mêmes conditions. Les sulfures associés au minerai peuvent également avoir un impact sur le traitement hydrométallurgique, par exemple lorsque le cyanure est utilisé pour le lessivage de l'or et que les minéraux sulfurés se font concurrence dans l'utilisation des réactifs.

- **Méthodes d'analyse du carbone**

L'identification des minéraux hébergeant du carbone peut s'avérer importante pour caractériser le comportement de la roche pendant le traitement ou le stockage. Le graphite et le carbone organique peuvent causer des problèmes lors du traitement hydrométallurgique à base de cyanure. L'or pris en solution lors d'une digestion au cyanure peut s'adsorber sur le graphite et le carbone organique dans un processus appelé vol de pétrole. [55]

III.3.5 Caractérisation Environnementale Et Géochimique

III.3.5.1 Essais Statiques De Prédiction Du Drainage Minier Acide

Les essais statiques ont été réalisés afin d'évaluer le potentiel de génération d'acide des résidus miniers de Chaâbat El Hamra. Ces essais reposent principalement sur la méthode ABA (Acid-Base Accounting), qui permet de comparer le potentiel acidogène lié à l'oxydation des sulfures avec le potentiel neutralisant apporté par les minéraux carbonatés.

Le potentiel d'acidité (PA) est déterminé à partir de la teneur en soufre sulfuré des résidus selon la relation suivante :

$$PA = 31.25 \times \%S_{\text{sulfure}}$$

Où :

- ✓ PA : potentiel d'acidité (kg CaCO₃/t)
- ✓ %S_{sulfure} : teneur en soufre sulfuré (%)

Le potentiel de neutralisation (PN) est évalué par attaque acide à l'acide chlorhydrique suivie d'un dosage en retour, afin de déterminer la capacité des carbonates présents dans les résidus à neutraliser l'acidité générée.

$$PN = \frac{V \times 50}{P}$$

Le potentiel net de neutralisation (PNN) est calculé par :

$$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$$

Le rapport PN/PA constitue également un indicateur important pour l'évaluation du comportement environnemental des résidus :

$$\text{PNN} = \frac{\text{PN}}{\text{PA}}$$

III.3.5.2 Potentiel De Neutralisation (PN)

Etalonnage de la solution d'acide sulfurique, introduire à l'aide d'une pipette 40ml de la solution de Na_2CO_3 dans un becher de 250ml puis diluer à environ 100ml avec de l'eau et tirer avec la solution d'acide sulfurique jusqu'à pH 5,0 et noter le volume ajouté et puis peser une portion de 2g d'échantillon préalablement homogénéisé et séché à 105°C

Dans un becher et ajouter 100ml d'eau (l'échantillon doit être tamisé à 500µm) et agiter pendant 15 minutes avec barreau aimanté, après cette étape, mesurer le pH initial de l'échantillon et tirer avec la solution d'acide sulfurique jusqu'à un pH de $3,5 \pm 0,1$ tout en gardant une agitation constante.

Ce tirage peut s'effectuer d'une façon manuelle (ajout d'acide sulfurique à environ toutes les 30 minutes jusqu'à ce que soit de $3,5 \pm 0,1$ pendant 4 heures), et noter le volume final. [30]

III.3.5.3 Potentiel De Génération D'acide (PA)

Tous les rejets de traitement ne sont pas générateurs de drainage acide. En effet, certains minéraux comme les carbonates, les hydroxydes ou les silicates peuvent neutraliser, totalement ou en partie, l'acidité produite par l'oxydation des sulfures.

Il s'établit un équilibre de dissolution des minéraux neutralisants, pouvant aussi entraîner la réprécipitation et la fixation des ions métalliques solubles. Leur réaction acido basique avec l'acide sulfurique neutralise la solution acide résultant de la percolation des rejets. Le potentiel acide (PA) représente la quantité de CaCO_3 nécessaire à la neutralisation de l'acide produit par la seule dissolution de la pyrite (sulfure généralement le plus abondant).

La détermination du potentiel d'acidité se mesure avec le pourcentage de soufre dans l'échantillon. Le pourcentage de soufre détermine par une méthode de dosage chimique. Le potentiel d'acidité se calcule à partir du résultat de soufre [30]

III 3.5.4. Essais cinétiques (cellules humides)

Les essais en cellules humides (humidité celles), réalisés selon le protocole ASTM D5744-18, permettent de suivre l'évolution temporelle de la qualité des eaux de drainage sur une période de 20 à 40 semaines minimum. Le principe consiste à soumettre un échantillon de résidus à des cycles alternés d'air sec (3 jours), d'air humide (3 jours) et de rinçage à l'eau dé ionisée (1 jour), et à analyser les lixiviats hebdomadaires

III.3.5.5 Mesure Du Ph De Pâte Et Acidité Actuelle

Le potentiel d'hydrogène est un paramètre qui permet de mesurer le degré d'acidité ou de basicité d'une substance. En pratique, le pH est déterminé en préparant un mélange de rapport matériau/eau distillée de 15. Cette solution est soumise à une agitation pendant 30sec suivie d'un repos de 20mn. L'opération est répétée trois fois, avant de mesurer la valeur du pH à l'aide d'un pH-mètre de type 3510.

D'après le bulletin d'analyse, la valeur du pH-labo est de 7,8. Cette valeur est comprise dans la plage de référence indiquée sur le tableau, soit $6,5 < \text{pH} < 8,5$. Cela signifie que l'échantillon présente un milieu neutre à légèrement basique, donc une acidité actuelle faible.

Le pH de pâte mesuré est de 7,8, ce qui indique un milieu légèrement basique et une acidité actuelle faible. Cette valeur reste conforme aux limites admissibles du tableau d'analyse.

pH de pâte = 7,8

Acidité actuelle : faible

Interprétation : milieu neutre à légèrement basique

Conformité : valeur dans les limites fixées ($6,5 < \text{pH} < 8,5$).

III.4 Résultats Et interprétations Sur La Caractérisation

III.4.1 Caractéristiques Physiques Et Granulométriques

a) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des rejets de la digue a été réalisée et les résultats sont présentés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.2: Résultat de répartition granulométrique des rejets de traitement de minerai Zinc

Tranche granulométrique (mm)	Rendement poids (g)	Rendement (%)	Refus cumulé Rc (%)	Passant cumulé Pc (%)
>4	16.70	2.78	2.78	100
-4 +2	37.1	6.18	8.96	97.22
-2 +1	39.29	6.55	15.51	91.04
-1 +0.5	38.70	6.46	21.97	84.49
-0.5 +0.25	64.60	10.76	32.73	78.03
-0.25 +0.125	98.96	16.49	49.22	67.27
-0.125 +0.063	117.44	19.58	68.80	50.78
-0.063 +0.045	52.67	8.77	77.57	31.2
<0.045	134.54	22.43	100	22.43
	600	100		

Les résultats obtenus sont présentés dans le schéma de la figure III.2

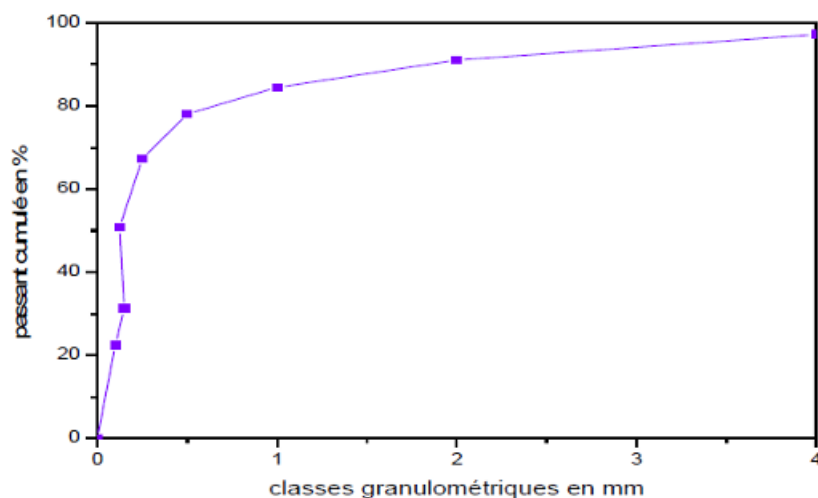


Figure III.1 : Courbe de la répartition granulométriques des rejets miniers sulfurés de Chaâbet-El-Hamra

Selon la courbe granulométriques, on remarque que plus de 80% des particules des rejets miniers sont inférieurs à 1mm ce qui présente une population homogène.

III.4.2 Densité et masse volumique

Tableau III.3: Propriétés physiques des résidus

Paramètre	Résidus de traitement	Stériles de mine
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,85 – 3,20	2,65 – 2,80
Masse volumique apparente sèche (g/cm ³)	1,40 – 1,65	1,80 – 2,10
Porosité totale (%)	42 – 52	25 – 35
Indice des vides (e)	0,72 – 1,08	0,33 – 0,54
Teneur en eau naturelle (%)	8 – 25	3 – 8
Surface spécifique BET (m ² /g)	2,5 – 8,0	0,5 – 2,0

III.4.3 Composition Minéralogique

➤ Résultats et interprétations

Les principales observations d'après les diffractogrammes sont résumées dans la figure 2, On constate que les rejets de la digue montrent que les principaux minéraux contenu dans ces résidus sont : marcassite, molybdénite, greenockite, scotlandi et covellite.

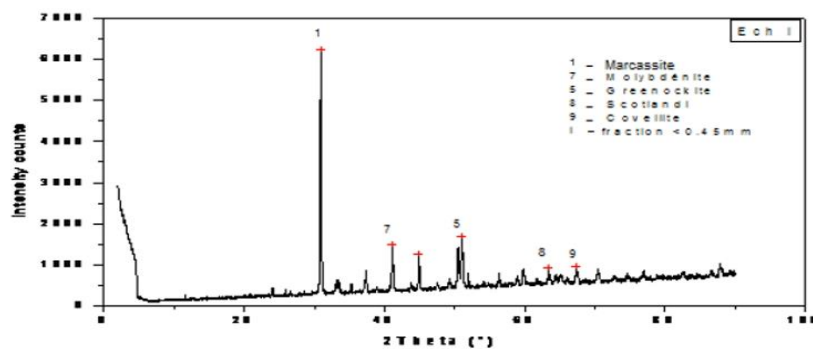


Figure III.2 : Composition minéralogique des rejets miniers de la fraction inférieure 0,45mm.

D'après la caractérisation granulométrique et minéralogique réalisé par diffractomètre à rayons X sur le site de la digue, les résultats obtenues par DRX sont donnés dans le tableau 4.

Tableau III.4 : Composition minéralogique des classes granulométriques de la digue de Chaâbet-El-Hamra (Sétif)

N°	Echantillons par classe	Minéraux identifiés
1	> 4	Marcassite(FeS_2), Réalgar (AsS), covelline (CuS)
2	-4 +2	Marcassite(FeS_2), Réalgar (AsS), bornite (Cu_5FeS_4)
3	-2 +1	Marcassite(FeS_2), Réalgar (AsS), sphalérite (ZnS)
4	-1 +0.5	Marcassite(FeS_2), Anglésite (PbSO_4), chalcosine (Cu_2S)
5	-0.5 +0.25	Marcassite(FeS_2), chalcopyrite (CuFeS_2)
6	-0.25 +0.125	Marcassite(FeS_2), Greenockite (CdS), bornite (Cu_5FeS_4)
7	-0.125 +0.63	Marcassite(FeS_2), chalcopyrite (CuFeS_2), Linnaéite (CoS), sphalérite (ZnS), chalcosine (Cu_2S)
8	-0.63 +0.45	Marcassite(FeS_2), chalcopyrite (CuFeS_2), covelline (CuS), chalcosine (Cu_2S)
9	< 0.45	Marcassite(FeS_2), Molybdénite (MoS), Greenockite (CdS), Covellite (CuS),

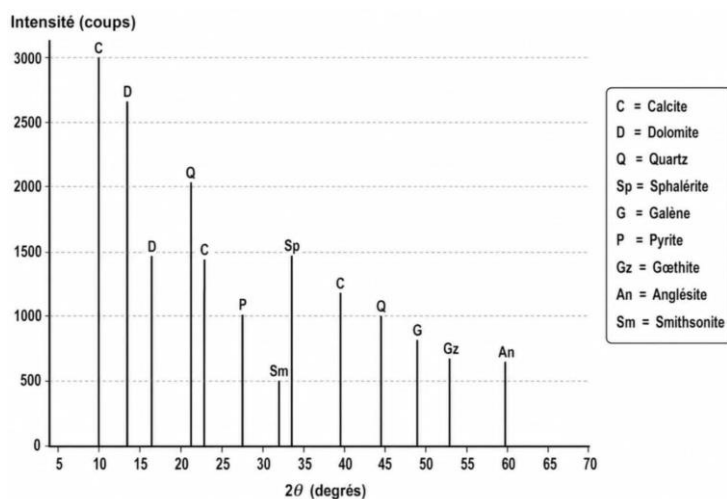


Figure III.3 : diffractogramme typique des résidus de Châabet-El-Hamra

Tableau III.5: Phases minérales identifiées et quantifiées par DRX (Rietveld)

Minéral	Formule chimique	Teneur (% massique)	Type
Calcite	CaCO_3	25 – 40	Gangue/carbonaté
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	10 – 20	Gangue/carbonaté
Quartz	SiO_2	8 – 15	Gangue/silicaté
Pyrite	FeS_2	5 – 15	Sulfure
Sphalérite	ZnS	2 – 8	Sulfure (minéral)
Galène	PbS	1 – 5	Sulfure (minéral)
Marcasite	FeS_2	1 – 3	Sulfure
Barytine	BaSO_4	1 – 5	Gangue
Gaëthite	FeOOH	2 – 8	Oxyde secondaire
Smithsonite	ZnCO_3	1 – 3	Carbonate secondaire
Cérusite	PbCO_3	0,5 – 2	Carbonate secondaire
Anglésite	PbSO_4	0,5 – 2	Sulfate secondaire
Hémimorphite	$\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	traces – 1	Silicate secondaire
Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	traces – 2	Sulfate secondaire
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	traces – 3	Sulfate secondaire
Argiles (illite, kaolinite)	-	3 – 8	Silicates

III.4.4 Composition Chimique Élémentaire

➤ Résultats et interprétations

Les analyses panoramiques ont été réalisées par Spectrométrie d’Absorption Atomique et par Spectrométrie d’Emission Atomique sur 10 échantillons et ont permis la recherche de 13 éléments. Les résultats sont présentés dans le tableau 6, quant aux analyses chimiques quantitatives effectuées par SAE et par spectrométrie d’absorption atomique SAA, mis en

solution dans l'acide chlorhydrique (HCl) précédée d'une fusion au peroxyde de sodium (Na_2O_2).

- ✓ les éléments majeurs : présents à des concentrations supérieures à 0,1% en masse;
- ✓ les éléments mineurs : présents à des concentrations inférieures à 0,1% ;
- ✓ les éléments traces et ultra-traces : de l'ordre de 0,01% (100 ppm) à la limite de détection (30 à 50 ppm).

Tableau III.6 : Analyses chimiques des rejets miniers de Châabet-El-Hamra de la fraction

Zn	Fe	S	Ca	Cu	Pb	Cd	As	K	Na	Mg	CO ₂	SO ₄ ²⁻
1,5	8,75	9,33	16,49	0,50	0,5	0,02	0,03	0,40	0,40	2,69	6,73	12,66

Au vu de ces résultats les rejets miniers de Châabet-El-Hamra sont porteurs des métaux lourds (Cu, Cd, As, Pb) et le zinc d'une valeur élevée. Le teneur de 9% soufre est susceptible de présenter un danger probable de drainage minier acide (DMA) en présence d'air et de l'écoulement des eaux superficielles.

Cependant la directive Canadienne (019) relative à l'industrie minière et l'environnement, les concentrations en ETM ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes dans le rejet final .

Tableau III.7 : Exigences au point de rejet de l'effluent final

Paramètre	Concentration moyenne mensuelle acceptable	Concentration maximale acceptable
Arsenic extractible	0,2 mg/l	0,4 mg/l
Cuivre extractible	0,3 mg/l	0,6 mg/l
Fer extractible	3 mg/l	6 mg/l
Nickel extractible	0,5 mg/l	1 mg/l
Plomb extractible	0,2 mg/l	0,4 mg/l
Zinc extractible	0,5 mg/l	1 mg/l
Cyanures totaux	1 mg/l	2 mg/l
Hydrocarbure (C10-C50)		2 mg/l
Matières en suspension	15 mg/l	30 mg/l

III.4.5 Résultats Fluorescence X (XRF) et ICP-OES

La composition chimique des résidus miniers a été déterminée par fluorescence X (XRF) pour les éléments majeurs, et par ICP-OES pour les éléments traces après digestion acide.

Tableau III.8 : Composition chimique en éléments majeurs (% massique)

Élément/Oxyde	Teneur (%)	Origine principale
SiO ₂	15 – 25	Quartz, silicates
Al ₂ O ₃	3 – 8	Argiles, feldspaths
Fe ₂ O ₃ (total)	8 – 18	Pyrite, oxydes de fer secondaires
CaO	18 – 30	Calcite, dolomite
MgO	4 – 8	Dolomite
K ₂ O	0,5 – 1,5	Argiles (illite)
Na ₂ O	0,2 – 0,8	Feldspaths
SO ₃	5 – 15	Sulfures (pyrite, sphalérite, galène), sulfates secondaires
TiO ₂	0,1 – 0,3	Minéraux accessoires
MnO	0,1 – 0,5	Carbonates de Mn
P ₂ O ₅	0,05 – 0,2	Apatite
LOI (perte au feu)	15 – 25	Carbonates, eau structurale

Tableau III.9 : Teneurs en métaux et métalloïdes (ppm ou % selon les éléments)

Élément	Teneur	Norme algérienne (sols)	Facteur de dépassement
Zn	1,5 – 5,0 %	300 ppm	50 – 167x
Pb	0,5 – 3,0 %	100 ppm	50 – 300x
Fe (total)	6 – 12 %	-	-
Cu	50 – 200 ppm	100 ppm	0,5 – 2x
Cd	20 – 150 ppm	3 ppm	7 – 50x
As	30 – 200 ppm	20 ppm	1,5 – 10x
Sb	10 – 80 ppm	10 ppm	1 – 8x
Ba	500 – 5000 ppm	-	-
Ag	5 – 50 ppm	-	-
Hg	0,5 – 5 ppm	1 ppm	0,5 – 5x
Ni	10 – 30 ppm	50 ppm	< 1x
Cr	15 – 40 ppm	150 ppm	< 1x

Les teneurs en Zn et Pb sont particulièrement élevées, confirmant le potentiel de retraitement de ces résidus. La présence significative de Cd est liée à sa substitution dans la structure cristalline de la sphalérite (la sphalérite peut contenir jusqu'à 1-2% de Cd en substitution du Zn). [33]

III.5 Caractérisation Environnementale Et Géochimique

III.5.1 Ph De Pâte Et Acidité Actuelle

L'analyse thermodynamique de l'état de surface de la pyrite, démontre que l'oxydation de la pyrite et du soufre présente de nombreux composés dérivés du fer et du soufre, principalement les éléments suivants : Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{FeO}(\text{OH})$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, HFeO_2 , FeO^{-2}_2 , FeO^{-2}_4 , FeCO_3 , FeSO_4 , SO^{-2}_4 , HSO^{-}_4 , SO^{-2}_3 , $\text{S}_2\text{O}^{-2}_3$, S^0 , S^{2-} , HS^- , H_2S .

Ils démontrent, aussi que les produits d'oxydation de la pyrite les plus probables (à n'importe quelle variante de l'oxydation du soufre des minéraux) sont : Fe_2O_3 et Fe_3O_4 . Cependant, d'après les travaux indiquent que lors de la précipitation du fer des solutions de ses sels, on obtient non seulement le Fe_2O_3 et Fe_3O_4 mais aussi par rapport à ceux-ci il se produit une réduction de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et le $\text{Fe}(\text{OH})_3$, réagissant avec une grande sensibilité au changement des valeurs de pH et Eh - potentiel du milieu.

Cependant, on peut présenter l'oxydation de la pyrite en FeCO_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$ avec le dégagement de SO_4^{-2} , HSO_4^{-} .

Le tableau N°10 synthétise les différentes réactions d'oxydation de la pyrite en présence d'eau, d'oxygène et aussi en fonction du pH. Ces réactions peuvent se produire simultanément, en différents endroits de la surface, dépendamment de la réactivité induite par la cristallinité. Ces types de réactions possèdent chacune des caractéristiques thermodynamiques et cinétiques (la thermodynamique contrôle l'état final de la réaction à l'équilibre alors que la cinétique contrôle la notion de vitesse des réactions). Ces deux aspects sont très importants dans le cas de la flottation des sulfures non valorisables telle que la pyrite est donc capital.

Tableau III.10 : Synthèse des réactions chimiques sur la surface de la pyrite

	Réactions	ΔF^0 des réactions, Kcal	E0, Kcal/m ol
6.1	$\text{FeS}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{SO}_4^{-2} + 18\text{H}^+ + 14\text{e}$	+134,94	+0,418
6.2	$\text{FeS}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HSO}_4^{-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}$	+129,74	+0,402
6.3	$\text{FeS}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{-2} + 19\text{H}^+ + 15\text{e}$	+141,20	+0,408
6.4	$\text{FeS}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{HSO}_4^{-} + 17\text{H}^+ + 15\text{e}$	+136,00	+0,393
6.5	$\text{FeS}_2 + \text{CO}_3^{-2} + 8\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{FeCO}_3 + 2\text{SO}_4^{-2} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}$	+102,29	+0,317
6.6	$\text{FeS}_2 + \text{CO}_3^{-2} + 8\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{FeCO}_3 + 2\text{HSO}_4^{-} + 14\text{H}^+ + 14\text{e}$	+97,09	+0,300
6.7	$\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}$	+6,26	+0,271
6.8	$\text{FeCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{CO}_3^{-2} + 3\text{H}^+ + \text{e}$	+38,91	+1,68
6.9	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	+20,08	
6.10	$\text{FeCO}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{-2}$	+14,54	

Les résultats de l'activité des composants ioniques du fer : $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})^{2+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})^{+2}]$, $[\text{Fe}^{2+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})^+]$ и $[\text{HFeO}^{-2}]$, se trouvant en équilibre avec FeS_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et FeCO_3 , montrent que, dans tous les cas l'ion principal issu de l'oxydation de la pyrite est l'ion du fer bivalent (Fe^{2+}).

	Réactions et équations	K	ΔF^0 Réaction, Kcal	E^0 , V
7.17	$\text{Fe(OH)}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	$6,93.10^{-38}$	50,69	
7.18	$\text{Fe(OH)}_2 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	$1,89.10^{-15}$	20,08	
7.19	$\text{FeCO}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{-2}$	$2,19.10^{-11}$	14,54	
7.20	$\text{Fe(OH)}^{+2} \Leftrightarrow \text{Fe(OH)}^{2+} + \text{OH}^-$	$4,95.10^{-10}$	12,695	
7.21	$\text{Fe(OH)}^{2+} \Leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$2,68.10^{-12}$	15,79	
7.22	$\text{Fe(OH)}^+ \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{OH}^-$	$4,41.10^{-6}$	7,31	
7.23	$\text{H}_2\text{CO}_3 \Leftrightarrow \text{HCO}_3^{-} + \text{H}^+$	$4,26.10^{-7}$	8,69	
7.24	$\text{HCO}_3^{-} \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{-2}$	$4,677.10^{-11}$	14,09	
7.25	$\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	10^{-14}	19,095	
7.26	$[\text{Fe}^{2+}] + [\text{Fe(OH)}^+] = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^{-}] + [\text{CO}_3^{-2}]$			
7.27	$3 \text{Fe}^{3+} + \text{Fe(OH)}^{+2} + 2 \text{Fe(OH)}^{2+} + \text{H}^+ = \text{OH}^-$			

7.28	$2\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+ = \text{OH}^-$			
7.29	$2\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+ = \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-} + \text{OH}^-$			
7.30	$\text{Fe} + 3\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3$		-53,22	-0,769
7.31	$\text{Fe} + 2\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$		-80,38	-1,743
7.32	$\text{Fe} + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons \text{FeCO}_3 + 2\text{e}^-$		-34,84	-0,755
7.33	$E = +0,057 + 0,059\text{pH}$			
7.34	$E = -0,917 + 0,059\text{pH}$			
7.35	$E = -0,755 - 0,059.\lg.[\text{CO}_3^{2-}]$			

➤ pH d'équilibre du système « $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -eau on a utilisé les équations [7.17], [7.20], [7.21] et [7.25] du Tableau 11. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.5.

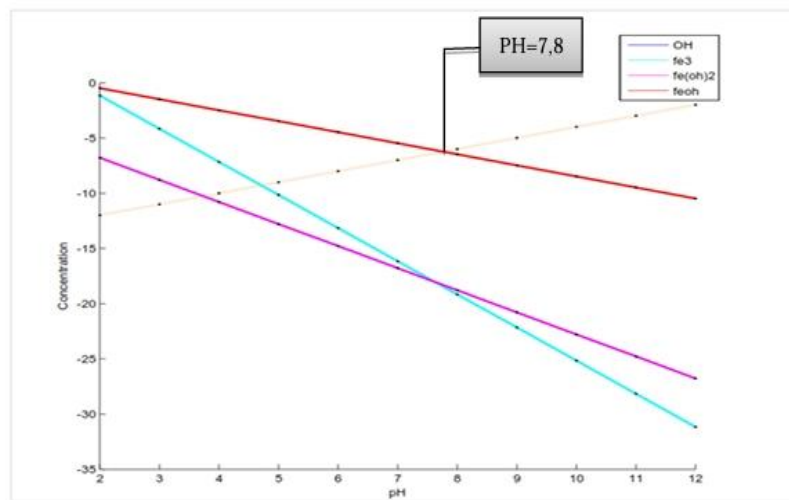


Figure III.5 : influence du pH sur la concentration des ions $[\text{OH}^-, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}(\text{OH})^{2+}, \text{Fe}(\text{OH})^{2+}]$

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système « $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – eau» est égale à 7,8.

➤ PH d'équilibre du système « FeCO_3 – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du FeCO_3 -eau on a utilisé les équations [7.19], [7.23], [7.24] et [7.25] du Tableau 11. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.6.

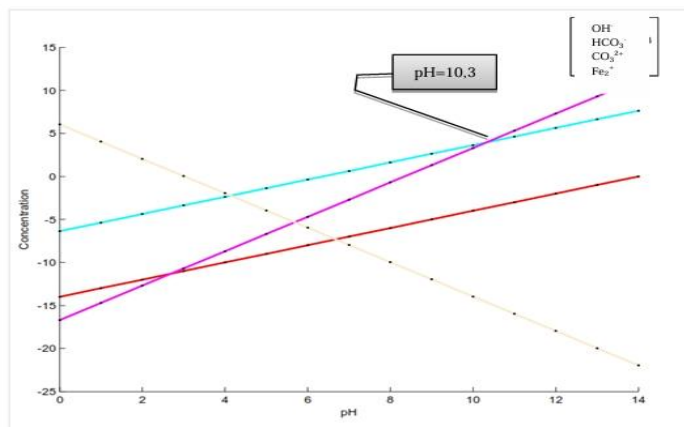


Figure III.6 : influence du pH sur la concentration des ions [OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Fe^{2+}]

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système « FeCO_3 – eau» est égale à 10,3.

➤ PH d'équilibre du système « $\text{Fe}(\text{OH})_2$ – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du $\text{Fe}(\text{OH})_2$ - eau on a utilisé les équations [7.18], [7.22] et [7.25] du Tableau III.11. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.7.

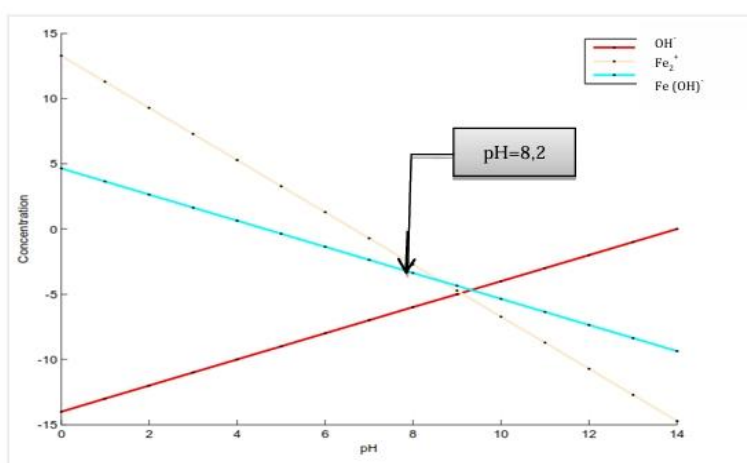


Figure III.7: influence du pH sur la concentration des ions [OH^- , Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^+$]

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système «Fe(OH)₂ – eau» est égale à 8,2.

III.5.2 Potentiel De Génération D'acide Et De Neutralisation (Essais Statiques)

Tableau III.12 : Classification du rapport PN/PA

Rapport PN/PA	Classification	Interprétation
PN/PA < 1	Générateur d'acide	Les résidus présentent un risque élevé de génération de drainage minier acide (DMA).
1 < PN/PA < 2,5	Zone d'incertitude	Le comportement des résidus reste incertain et nécessite des essais cinétiques complémentaires.
PN/PA > 2,5	Non générateur d'acide	Les résidus possèdent une capacité de neutralisation suffisante pour limiter la génération d'acidité.

Tableau III.13 : Résultats typiques de l'essai ABA sur les résidus de Chaâbat El Hamra

Paramètre	Valeur typique	Interprétation
S total (%)	5 – 12	Teneur élevée en sulfures
S sulfuré (%)	3 – 10	Source principale d'acide
S sulfaté (%)	1 – 3	Sulfates secondaires
PA (kg CaCO ₃ /t)	94 – 312	Potentiel acidogène élevé
PN (kg CaCO ₃ /t)	200 – 400	Potentiel neutralisant important (carbonates)
PNN (kg CaCO ₃ /t)	+50 à +150	Généralement positif
Ratio PN/PA	1,2 – 3,5	Zone incertaine à non génératrice

Le cas de Chaabat El Hamra est particulièrement intéressant car la gangue fortement carbonatée (calcite + dolomite = 35-60%) confère aux résidus un potentiel de neutralisation significatif qui peut, dans de nombreux cas, contrebalancer le potentiel d'acidité lié aux sulfures. Cependant, la cinétique de neutralisation par les carbonates peut être plus lente que la cinétique d'oxydation des sulfures dans certaines conditions, ce qui ne garantit pas l'absence de DMA à long terme. [34]

III.5.3 Résultats des essais cinétiques

Les résultats attendus pour les résidus de Chââbet-El-Hamra montrent :

- Un **pH des lixiviats** généralement maintenu dans une gamme **neutre à légèrement alcaline** (6,5-8,0) grâce à l'effet tampon des carbonates
- Des **concentrations en sulfates** élevées (200-2000 mg/L) indiquant une oxydation active des sulfures
- Des **concentrations en Zn** significatives (5-50 mg/L) dépassant les normes de qualité des eaux
- Des **concentrations en Pb** plus faibles (0,1-5 mg/L) mais dépassant également les normes
- Une tendance à **l'épuisement progressif du pouvoir tampon** des carbonates sur le long terme

III.6 Impact Sur Les Eaux Et Les Sols Environnants

III.6.1 Impacts sur l'eau

L'exploitation de la mine n'aura aucun impact sur les eaux ; en effet L'exploitation de la mine n'aura pas pour conséquence une modification de l'écoulement hydrique, ni déviation de cours d'eau. cependant une modification du niveau piézométrique de la nappe du fait du pompage de la nappe hauterivienne pendant les travaux d'exploitation pour assécher la zone souterraine jusqu'au profil 15 (Niveau 830). Cette eau de bonne qualité est destinée à alimenter les besoins en eau domestique de la population d'Ain Azel.

L'enrichissement du minerai tout venant de Chââbet-El-Hamra se fait par voie humide. Les rejets liquides industriels qui proviennent de l'usine d'enrichissement sont transportés par

une canalisation vers la digue de rejet. Après décantation de ces rejets l'eau claire rejoint l'oued.

Il est recommandé cependant d'effectuer périodiquement des analyses de contrôle des eaux rejetées dans l'oued et tenir à jour un registre sur lequel seront inscrits les différentes analyses.

III.6.2 Impact sur le sol

L'exploitation de la mine de Châabet-El-Hamra, objet de la présente étude se fera par la méthode de chambres et pilier, selon les règles de l'art dans le domaine de l'exploitation minière souterraine. Le risque d'un affaissement en raison des vides créés par l'exploitation souterraine existe. L'affaissement est un phénomène progressif lié à la présence de cavités à moyenne ou grande profondeur. La rupture de ces cavités se propage vers la surface en provoquant un tassement des terrains qui se traduisent par la formation d'une cuvette d'affaissement.

L'impact est plus fortement ressenti au niveau des habitations en limite de cuvette car elles peuvent être soumises à des contraintes importantes. Bien que dans la zone d'étude et précisément dans la zone possible d'affaissement il n'existe aucune habitation ou infrastructure socio-économique ENOF envisage de mener, une étude géotechnique pour dimensionner les piliers résiduels au fond afin d'éviter les affaissements en surface.

III.6.3 Impact sur les cultures et forêts

Au niveau de la mine de Châabet-El-Hamra il est projeté lots de l'exploitation de la mine de pomper l'eau de la nappe hauterivienne. Du fait de la potabilité de cette eau, cette dernière est destinée à alimenter le barrage d'Ain Azel.

S'agissant des rejets de la laverie, il convient de souligner que ces demies sont acheminées par canalisation vers une digue de stockage de résidus et après décantation, l'eau claire est déversée dans l'oued. En définitive ces deux paramètres n'ont aucun impact sur les cultures et les sols.

III.6.4 Impact sur le milieu naturel

L'impact que peut avoir la reprise de l'exploitation minière dans la région n'a aucun impact sur la faune et la flore. Il convient de signaler que cette activité existe depuis 1979. Le

site de la mine de Châabet-El-Hamra possède un couvert végétal important, à noter qu'on ne nous signale aucune espèce écologiquement protégée dans cette zone.

III.6.5 Impact sur le paysage

L'exploitation de mine se faisant en souterraine l'activité n'a aucun impact sur le paysage.

III.6.6 Impact lie aux bruits

L'exploitation souterraine de la mine de Châabet-El-Hamra, l'impact lié au bruit est négligeable. Le faible impact lié aux bruits est le fait essentiellement

- ✓ Du transport du tout venant de Châabet-El-Hamra jusqu'à la laverie situé à Kherzet Youcef.
- ✓ Du concassage du matériau par le concasseur primaire situé en amont de l'usine d'enrichissement.

Toutes ces sources, compte tenu de la législation internationale en matière de conception et de normes des équipements fixes et mobiles, dont que très peu d'effet sur l'environnement.

III.6.7 Impact lies aux vibrations

En souterrain, les seules sources de vibrations proviennent des tirs à l'explosif. Comme les quantités utilisées sont faibles (150kg/jours) et du fait de la profondeur des travaux souterrains l'impact lié aux vibrations en surface est insignifiant.

III.6.8 Impact lies aux poussières

En surface la production de poussière est négligeable. Le transport du tout-venant sur 4 km de Châabet-El-Hamra jusqu'à la laverie située à Kherzet Youcef est effectué sur des itinéraires asphaltés réduisant au minimum la production de poussière excepté un tronçon non asphalté sur 200 m.

Dans la laverie, le traitement étant fait par voie humide il n'y'a pas de production de poussière. En souterrain le chargement du minerai ne produira pas de poussière du fait que le minerai est humidifié. [35]

III.7 Limites De L'étude De Caractérisation

- ✓ Le nombre d'échantillons analysés reste limité par rapport à l'étendue totale du dépôt des résidus.
- ✓ L'hétérogénéité des résidus miniers peut entraîner des variations locales de composition chimique et minéralogique.
- ✓ Certaines analyses ont été réalisées sur des fractions granulométriques spécifiques, ce qui peut ne pas représenter l'ensemble du matériau.
- ✓ Les techniques analytiques utilisées présentent des limites de détection pour certains éléments présents à de très faibles teneurs.
- ✓ L'étude de caractérisation a été effectuée à l'échelle laboratoire ; les résultats peuvent différer à l'échelle industrielle.
- ✓ Les conditions climatiques et les phénomènes d'altération naturels du site n'ont pas été suivis sur une longue période.
- ✓ L'absence de certaines analyses complémentaires (minéralogie quantitative, essais cinétiques, etc.) peut limiter l'interprétation complète du comportement des résidus.
- ✓ Les résultats obtenus dépendent de la qualité de l'échantillonnage et des conditions de préparation des échantillons.

III.8 conclusion

Il ressort de ce chapitre que le processus de caractérisation des rejets miniers repose sur une méthodologie précise et structurée, commençant par la phase d'échantillonnage sur site, suivie de la préparation des échantillons en laboratoire, jusqu'aux différentes analyses permettant de déterminer leurs propriétés.

Ces étapes ont permis d'obtenir des résultats presque fiables représentant la nature de ces rejets sur les plans physique, minéralogique et chimique, ce qui contribue à mieux comprendre leur comportement et à évaluer leur impact sur l'environnement. De plus, ces données constituent une base essentielle pour les étapes ultérieures de l'étude, notamment le choix des méthodes de traitement et les possibilités de revalorisation.

Chapitre IV :

Retraitement

des résidus

miniers

IV.1 Introduction

L'industrie minière joue un rôle essentiel dans le développement économique grâce à l'exploitation des ressources minérales nécessaires à plusieurs secteurs industriels. Cependant, les activités d'extraction et de traitement des minerais génèrent d'importantes quantités de résidus miniers, souvent stockés dans des parcs à résidus ou rejetés dans l'environnement. Ces résidus contiennent encore des fractions minérales valorisables ainsi que des substances pouvant présenter des risques environnementaux, notamment dans le cas des résidus sulfurés capables de produire un drainage minier acide.

Face aux enjeux environnementaux et économiques actuels, le retraitement des résidus miniers représente une solution durable permettant à la fois de réduire les impacts environnementaux et de récupérer des métaux ou matériaux utiles encore présents dans ces rejets. Grâce aux progrès technologiques, plusieurs méthodes de valorisation peuvent être appliquées, telles que la flottation, la lixiviation, la séparation gravimétrique ou encore des procédés physico-chimiques adaptés à la nature des résidus.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les différentes approches de retraitement et de valorisation des résidus miniers, en mettant en évidence leur importance dans la gestion durable des déchets miniers. Ce chapitre vise également à étudier les techniques les plus utilisées pour la récupération des éléments de valeur, la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration de l'exploitation des ressources minières. Enfin, une attention particulière sera accordée aux méthodes adaptées aux résidus sulfurés et à leur potentiel de valorisation dans le contexte minier actuel.

IV.2 Etat de l'art sur les résidus miniers sulfurés

Les résidus miniers sulfurés proviennent généralement des opérations de broyage et de flottation des minerais polymétalliques. Ils sont composés essentiellement de gangue minérale et de sulfures résiduels.

Les principaux minéraux sulfurés présents dans les résidus de Chaabet El Hamra sont :

La galène (PbS)

La sphalérite (ZnS)

La pyrite (FeS₂)

Les carbonates

Tels que

La calcite et la dolomite

Ces résidus présentent des risques environnementaux importants. En présence de l'eau et de l'oxygène, les sulfures s'oxydent et génèrent un drainage minier acide capable de libérer des métaux lourds dans l'environnement.

La pyrite est considérée comme le principal minéral responsable de cette acidification. Son oxydation entraîne la formation d'acide sulfurique et augmente la mobilité des métaux toxiques. Malgré leurs effets négatifs, les résidus miniers représentent également une ressource secondaire intéressante grâce à la possibilité de récupérer une partie des métaux utiles encore présents dans ces rejets.

IV.3 Méthodes de valorisation applicables aux résidus

IV.3.1 Flottation

La flottation est une méthode de séparation basée sur les propriétés de surface des minéraux. Elle permet de séparer les minéraux utiles des déchets grâce à des bulles d'air auxquelles certaines particules minérales s'attachent.

Les premières formes de flottation apparaissent à la fin du le dix-neuvième siècle. En 1860, William Haynes dépose l'un des premiers brevets liés à la séparation par huile. Ensuite, au début du le vingtième siècle, Frank Elmore et Stanley Elmore développent la flottation à mousse industrielle. Cette technique commence à être utilisée dans les mines vers 1905–1910 pour le traitement des minerais sulfurés comme le cuivre et le plomb. Avec le développement de l'industrie minière, la flottation devient l'une des méthodes les plus importantes de valorisation des minerais fins et des résidus miniers. [36]

IV.3.2 Lixiviation

La lixiviation est une méthode consistant à dissoudre les métaux contenus dans un minerai ou dans les résidus miniers à l'aide de solutions chimiques.

Cette méthode est connue depuis l'Antiquité, où les Romains utilisaient déjà des solutions acides pour extraire certains métaux. Cependant, la lixiviation moderne se développe surtout au dix-neuvième siècle avec l'évolution de la chimie industrielle. En 1887, John Stewart MacArthur avec Robert Forrest et William Forrest mettent au point le procédé de cyanuration pour l'extraction de l'or. Cette découverte représente une étape importante dans le développement de l'hydrométallurgie moderne. [37]

IV.3.3 Séparation gravimétrique

La séparation gravimétrique repose sur la différence de densité entre les minéraux afin de séparer les particules utiles des stériles.

Cette méthode est considérée comme l'une des plus anciennes techniques de traitement des minerais. Depuis l'Antiquité, les chercheurs d'or utilisaient déjà le lavage des sables dans les rivières pour récupérer l'or. La séparation gravimétrique ne possède pas un inventeur précis, car elle s'est développée progressivement à travers plusieurs civilisations. Durant la révolution industrielle, plusieurs équipements spécialisés apparaissent, comme les tables vibrantes, les spirales et les jagues, améliorant considérablement l'efficacité du procédé. [36]

IV.3.4 Séparation magnétique

La séparation magnétique est une méthode qui permet de séparer les minéraux selon leurs propriétés magnétiques.

Les premières utilisations du magnétisme remontent à la Chine ancienne avec la découverte des pierres magnétiques naturelles. Le développement industriel de cette méthode commence réellement à la fin du dix-neuvième siècle avec l'exploitation des minerais de fer. L'inventeur américain Thomas Edison participe au développement des séparateurs magnétiques destinés au traitement des minerais dans les années 1880. Par la suite, les séparateurs magnétiques à basse et haute intensité sont perfectionnés pour traiter différents types de minerais et résidus miniers. [38]

IV.3.5 Combinaison entre les méthodes de valorisation applicable aux résidus

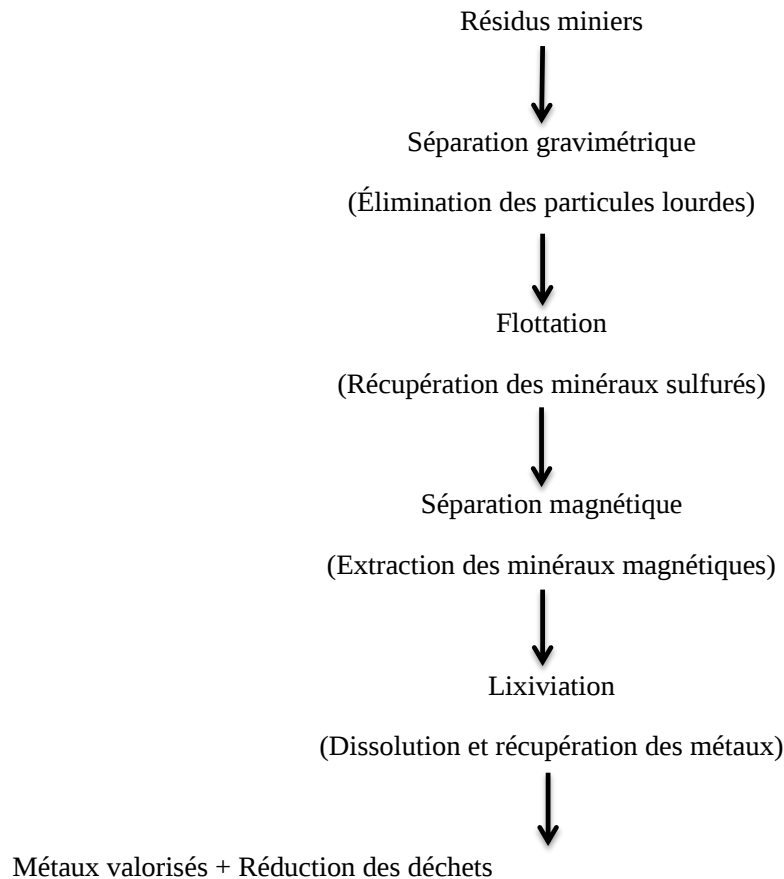


Figure IV.1 : Combinaison entre les Méthodes de valorisation applicable aux résidus

IV.4 Travaux antérieurs sur les résidus miniers de Chaâbet-El Hamra

Plusieurs études ont déjà été menées sur la valorisation des résidus de Chaâbat El Hamra, fournissant une base de connaissances utile pour la présente recherche.

La valorisation de la pyrite du gisement de Chaâbat El Hamra par flottation, avec l'objectif de produire un concentré commercialisable titrant 40 % S. Valorisation de la pyrite. [39] L'étude a démontré la faisabilité technique de la concentration de la pyrite par flottation, en utilisant un collecteur de type xanthate.

Flottation pour la désulfuration environnementale :

La désulfuration environnementale des résidus de Chaâbat El Hamra par flottation a été explorée par [40]. Leurs travaux ont montré qu'il était possible, après seulement 12 minutes de flottation, de réduire significativement la teneur en soufre des rejets. En utilisant du xanthate d'amyle comme collecteur (140 g/t), de l'huile de pin comme moussant (10 g/t), et du sulfate de cuivre comme activateur (60 g/t) à pH 5, ils ont obtenu une teneur en soufre de 19 % dans

le concentré de pyrite, contre 8 % dans l'alimentation initiale. La fraction flottée, riche en pyrite, présentait un potentiel acidogène élevé, tandis que les rejets de flottation, appauvris en soufre, étaient moins acidogènes. Les auteurs préconisent de recouvrir la fraction riche en pyrite avec des matériaux calcaires pour neutraliser le potentiel acide, et de recycler les rejets pauvres en soufre pour récupérer le zinc résiduel.

Étude géochimique et traitement :

La réalisation d'étude géochimique et des essais de traitement par flottation sur les résidus du complexe minier de Kherzet Youcef et Chaâbat El Hamra. Cette dernière a confirmé le potentiel de valorisation du plomb et du zinc par flottation, et a souligné l'importance de la désulfuration pour réduire la mobilité des éléments traces métalliques. [25]

Ces travaux antérieurs ont démontré la faisabilité de principe de la valorisation des résidus de Chaâbat El Hamra, mais ils n'ont pas pleinement intégré les aspects de récupération économique et de stabilisation environnementale dans un schéma de traitement unique et optimisé. De plus, l'impact de la libération minéralogique et de la granulométrie sur les performances de séparation n'a pas été étudié en détail. La présente étude vise à combler ces lacunes en proposant une approche intégrée, basée sur une caractérisation approfondie et des essais de valorisation systématiques.

IV.5 Méthodologie d'essai de valorisation

IV.5.1 Préparation de l'échantillon

Des échantillons de résidus miniers provenant de la mine de Chaâbet-El Hamra ont été prélevés, puis séchés à l'air libre afin d'éliminer l'humidité.

Ensuite, l'échantillon a été homogénéisé pour assurer une bonne représentativité lors des essais expérimentaux.

IV.5.2 Essais de flottation

Les essais de flottation ont été réalisés au niveau du laboratoire de traitement à l'ENP, en utilisant deux cellules de flottation de type Denver.

Le temps de conditionnement de chaque réactif est fixé pour tous les essais de flottation, il en est de même pour la durée de flottation. On récupère l'écume formée à la surface, pendant 5 mn pour le Pb et le Zn, correspondant à une flottation principale et/ou de contrôle. Pour chaque essai on mélange une quantité de 250g ou 375g de résidu (selon la cellule de

flottation) et un volume d'eau en respectant le rapport liquide /solide, on y a ensuite ajouté les réactifs selon le type de flottation [25]

Tableau IV.1 : Réactifs de flottation

Réactifs	Régime de flottation pour cycle de Pb	Régime de flottation pour cycle de Zn
Régulateur de pH	NaCO_3	CaO (régulateur de pH)
Déprimant	ZnSO_4	Na_2SiO_3 (déprimant)
Activant	KCN	CuSO_4
Collecteur	K Ethyl Xanthates	K Amyl Xanthates (collecteur)
Moussant	Huile de pin	Huile de pin (moussant)

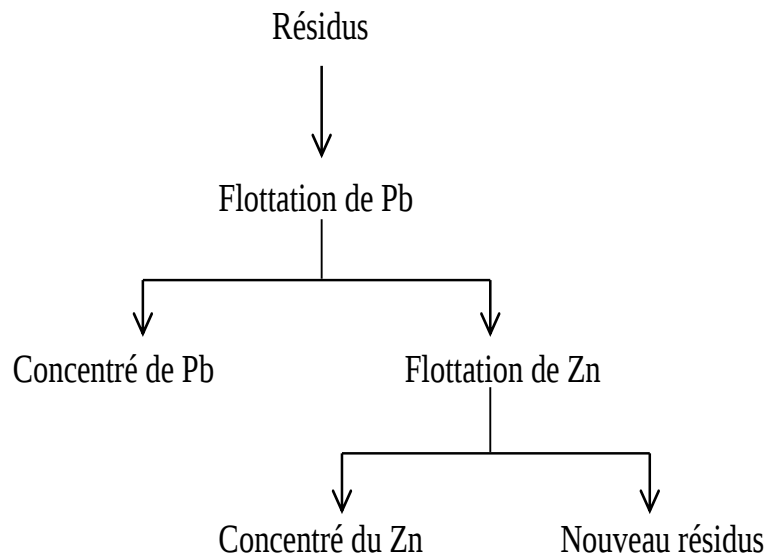


Figure IV.2 : Protocole des essais de valorisation des résidus

IV.5.3 Essais de désulfuration

Tests de désulfuration par flottation La Désulfuration environnementale est un procédé nouveau dans l'industrie minière qui a pour but la récupération de la fraction riche en soufre. Les étapes de conditionnement de la pulpe précédant la flottation ont été réalisées dans une cellule de flottation Denver 2,5l et sous agitation à 1200 tours par mn. Une étape de stabilisation de la pulpe a été effectuée pendant 20 mn, une étape de conditionnement du pH a été réalisée durant 10 mn, par ajout de H_2SO_4 dilué pour acidification. Une troisième étape de 10 mn a servi au conditionnement collecteur et le moussant a été ensuite additionné. [30]

IV.5.4 Essais de la Lixiviation

➤ Essai TCLP

L'essai TCLP utilise un fluide d'extraction acétique ($pH\ 4,93 \pm 0,05$ ou $pH\ 2,88 \pm 0,05$ selon le caractère alcalin du matériau) avec un ratio liquide/solide de 20:1, sous agitation pendant 18 ± 2 heures.

➤ Essai NF EN 12457 (essai de conformité)

Cet essai européen normalisé utilise l'eau déminéralisée comme fluide d'extraction, avec un ratio L/S = 10 L/kg, sous agitation pendant 24 heures.

IV.5.5 Essais de la séparation gravimétrique

Méthodologie Cette méthode repose sur la différence de densité entre les minéraux lourds et les minéraux légers.

- ✓ Matériels utilisés : Table à secousses Eau comme milieu de séparation
- ✓ Principe : Les minéraux lourds (sulfures de Pb et Zn) se déplacent dans une direction déterminée.

Les impuretés légères se séparent dans une autre direction.

IV.6 Résultats d'essais de valorisation

IV.6.1 Résultats des essais de flottation du zinc

Les essais de flottation du zinc ont donné les résultats suivants selon les conditions opératoires utilisées :

Avec l'utilisation de l'amyl xanthate comme collecteur à une dose de 150 g/t, la teneur en zinc obtenue est de 47,55 % avec un taux de récupération de 80,07 %. En présence de sulfate de cuivre comme activant à une dose de 200 g/t, la teneur en zinc est de 23,25 % avec une récupération de 85,59 %. L'utilisation de l'huile de pin comme moussant à une dose de 12,5 g/t a permis d'obtenir une performance de flottation améliorée. Pour un temps de flottation principale de 7 minutes, la teneur en zinc atteint 49,05 % avec une récupération maximale de 86,31 %. Le rapport liquide/solide appliqué est de 3/1. [41]

IV.6.2 Résultat d'essai de flottation sélective plomb zinc

Tableau IV.2 : Résultat d'essai de flottation sélective plomb zinc

Éléments	Avant traitement	Après flottation	Après désulfuration
Zn	2–6 %	35–55 %	0.5–1 %
Pb	0.5–2 %	40–65 %	0.1–0.5 %

Les résultats de la flottation ont montré une bonne efficacité dans la séparation du plomb et du zinc des résidus miniers. En effet, on observe une augmentation de la teneur en métaux dans les concentrés, accompagnée d'une diminution significative dans les rejets finaux.

De plus, le contrôle du pH ainsi que la re-broyage des échantillons ont contribué à améliorer le taux de récupération et la qualité de la séparation des phases minérales.

IV.6.3 Optimisation des paramètres de flottation

L'étude des paramètres opératoires a permis de déterminer les conditions optimales de séparation.

- ✓ Conditions optimales : pH = 9
- ✓ Collecteur : Xanthate
- ✓ Moussant : MIBC
- ✓ Temps de flottation : 10 minutes
- ✓ Granulométrie : < 80 µm

Ces conditions permettent d'améliorer la récupération des métaux tout en réduisant la quantité de rejet

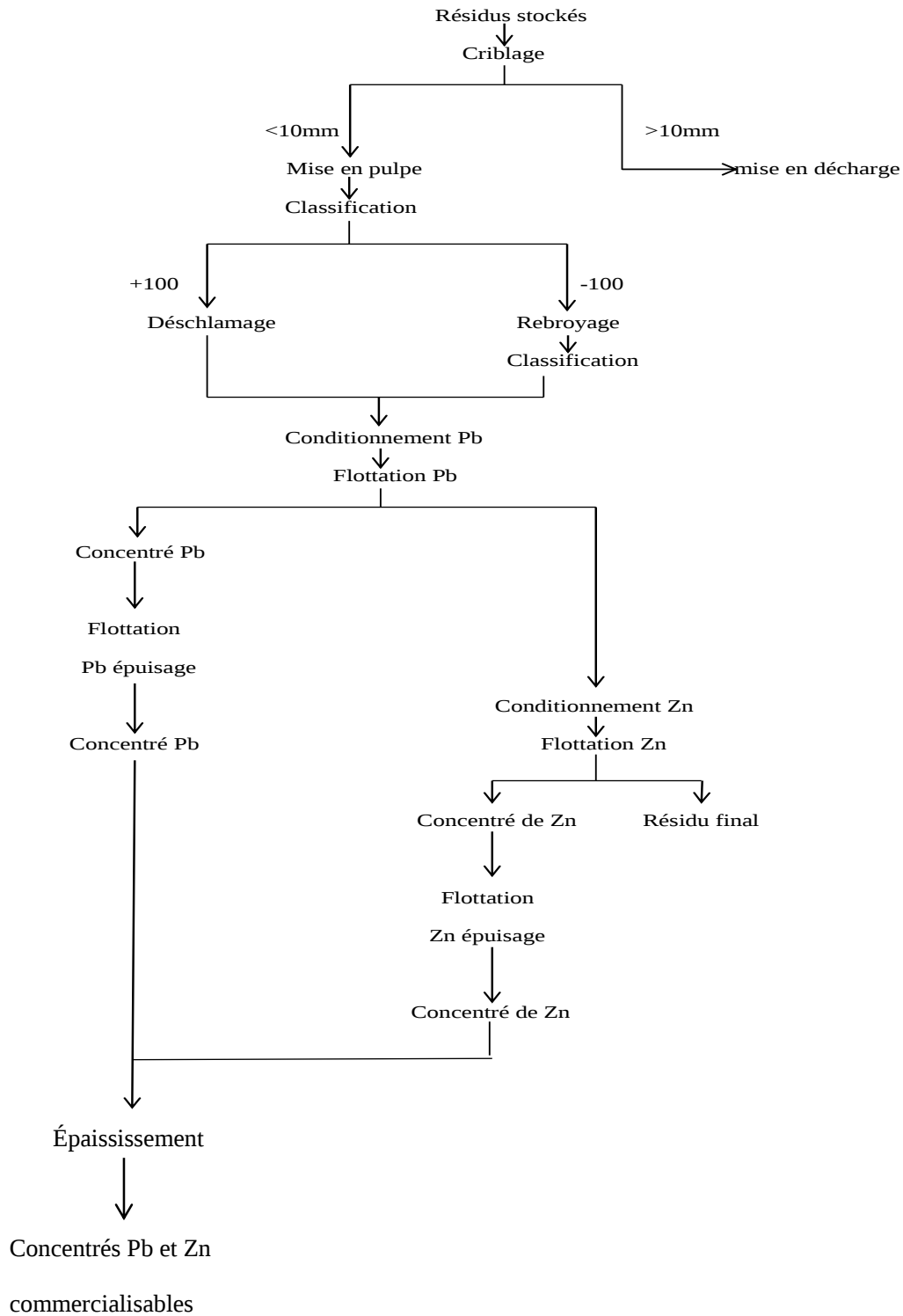


Figure IV.3: Schéma de procédé par flottation différentielle

IV.6.4 Résultat d'essais de désulfuration

Les essais de flottation de la pyrite ont donné les résultats suivants selon les conditions opératoires utilisées :

L'utilisation de l'amyl xanthate comme collecteur à une dose de 250 g/t a permis d'obtenir un taux de récupération de 87,62 %. Le sulfate de cuivre a été utilisé comme activant à une dose de 200 g/t. L'huile de pin a été utilisée comme moussant afin d'améliorer la formation de la mousse lors du processus de flottation. À un pH = 4, ajusté à l'aide d'acide sulfurique, le taux de récupération atteint 75,91 %. Pour un temps de flottation de 5 minutes, le taux de récupération est de 50,47 %. [39]

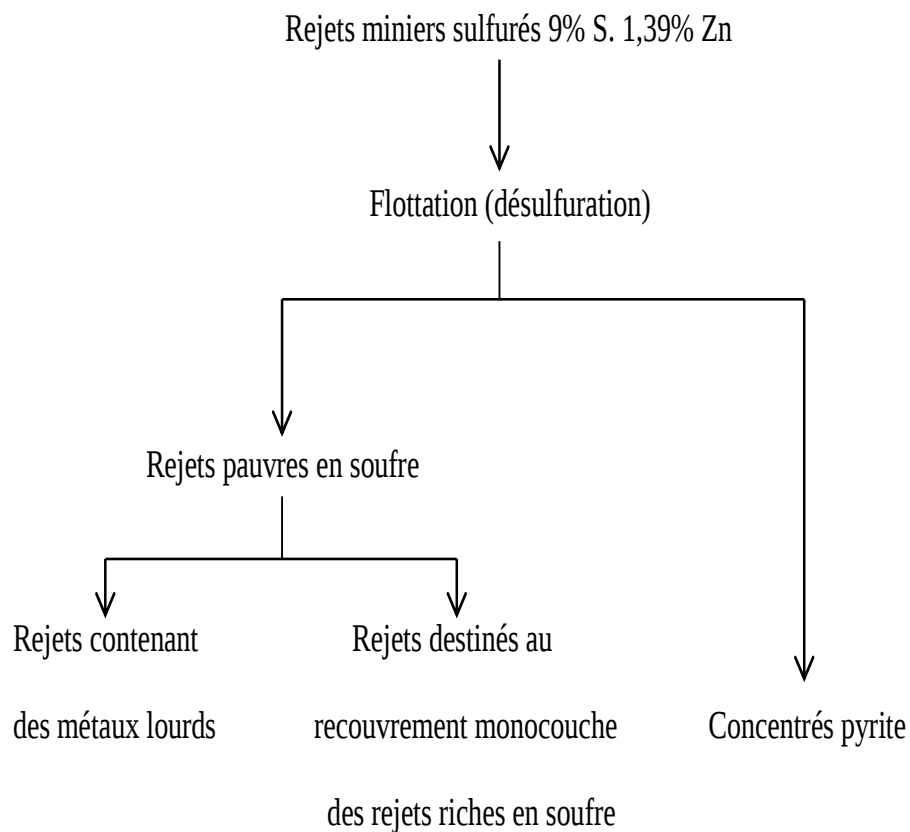


Figure IV.4: Diagramme de traitement et de gestion des rejets miniers sulfurés

IV.6.5 Résultat d'essais Lixiviation

Tableau IV.3: Résultats de lixiviation et comparaison aux seuils réglementaires

Paramètre	TCLP (mg/L)	NF EN 12457 (mg/L)	Seuil TCLP (mg/L)	Seuil décharge inerte (mg/kg)
pH	5,5 – 7,0	7,5 – 8,5	-	-
Zn	50 – 300	5 – 50	250*	4
Pb	5 – 50	0,5 – 10	5	0,5
Cd	0,5 – 5	0,05 – 1	1	0,04
As	0,1 – 2	0,05 – 0,5	5	0,5
Fe	10 – 100	1 – 20	-	-
Cu	0,5 – 5	0,1 – 2	-	2
SO ₄ ²⁻	500 – 3000	200 – 2000	-	1000

Remarque : Le seuil TCLP pour le Zn est parfois considéré comme non réglementé par l'EPA, mais des limites de 250 mg/L sont parfois appliquées par les États.

Les résultats montrent que les résidus de Châabet El-Hamra dépassent fréquemment les seuils de toxicité pour le Pb et le Cd selon l'essai TCLP, et les seuils d'admission en décharge de déchets inertes selon la norme européenne. Ceci confirme leur caractère de déchet dangereux nécessitant une gestion appropriée (confinement, traitement ou retraitement).

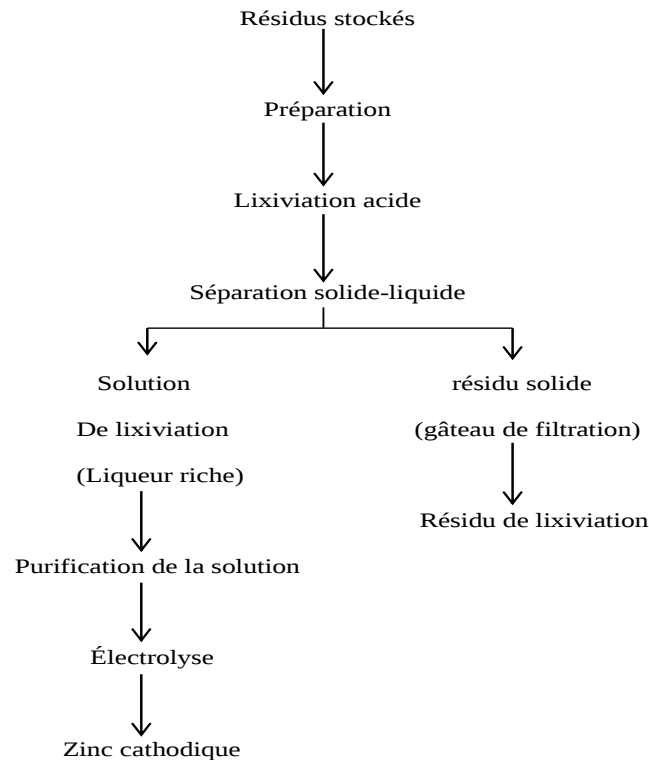


Figure IV.5: Schéma de procédé par voie hydrométallurgies

IV.6.6 Résultat d'essais de la séparation gravimétrique

Tableau IV.4 : Résultat d'essai de la séparation gravimétrique

Produits	Zn	Pb	Gangue
Concentré lourd	10–20 %	20–40 %	Réduit
Rejet	faible	faible	Faible

Les résultats obtenus montrent que la séparation gravimétrique permet de récupérer une partie des minéraux lourds grâce à la différence de densité.

Toutefois, son efficacité reste limitée, en particulier pour les particules fines présentes dans les résidus miniers.

IV.7 Evaluation environnementale après traitement

Évaluation environnementale des produits de traitement Les propriétés environnementales des produits issus des différentes opérations de traitement, notamment après flottation et désulfuration, ont été évaluées afin de déterminer la réduction de l'impact

environnemental des résidus miniers. Les résultats montrent une diminution notable de la teneur en soufre et en pyrite après traitement, ce qui contribue à réduire le risque de formation du drainage minier acide (DMA).

Par ailleurs, une baisse de la mobilité de certains métaux lourds vers le milieu aqueux a été observée, indiquant une amélioration de la stabilité chimique des résidus traités. Ainsi, les procédés de valorisation appliqués ne permettent pas uniquement la récupération des métaux précieux, mais contribuent également à la réduction des risques environnementaux liés aux rejets miniers.

Tableau IV.5 : Evaluation environnementale après traitement

Propriété environnementale	Avant traitement	Après traitement
Teneur en soufre	Elevée	Faible
Pyrite (FeS₂)	Elevée	Faible
Risque de DMA (Drainage Minier Acide)	Elevée	Réduit
Métaux lourds solubles	Elevée	Faibles
Stabilité environnementale	Faible	Améliorée

Tableau IV.6 : Résumé comparatif des méthodes

Méthodes	Efficacité sur le Zn	Efficacité sur le Pb	Élimination de la pollution
Flottation	élevée	élevée	Bon
Lixiviation	élevée	moyen	Moyen
Gravimétrie	faible	moyen	faible

Les résultats montrent que les différentes techniques de traitement des résidus miniers n'offrent pas la même efficacité. La flottation apparaît comme la méthode la plus performante pour la récupération du zinc et du plomb.

En revanche, la lixiviation contribue à augmenter la solubilisation de certains métaux, tandis que les méthodes gravimétriques et magnétiques présentent une efficacité limitée, notamment en présence de particules fines.

IV.8 Schéma intégré de retraitement et de valorisation des résidus miniers

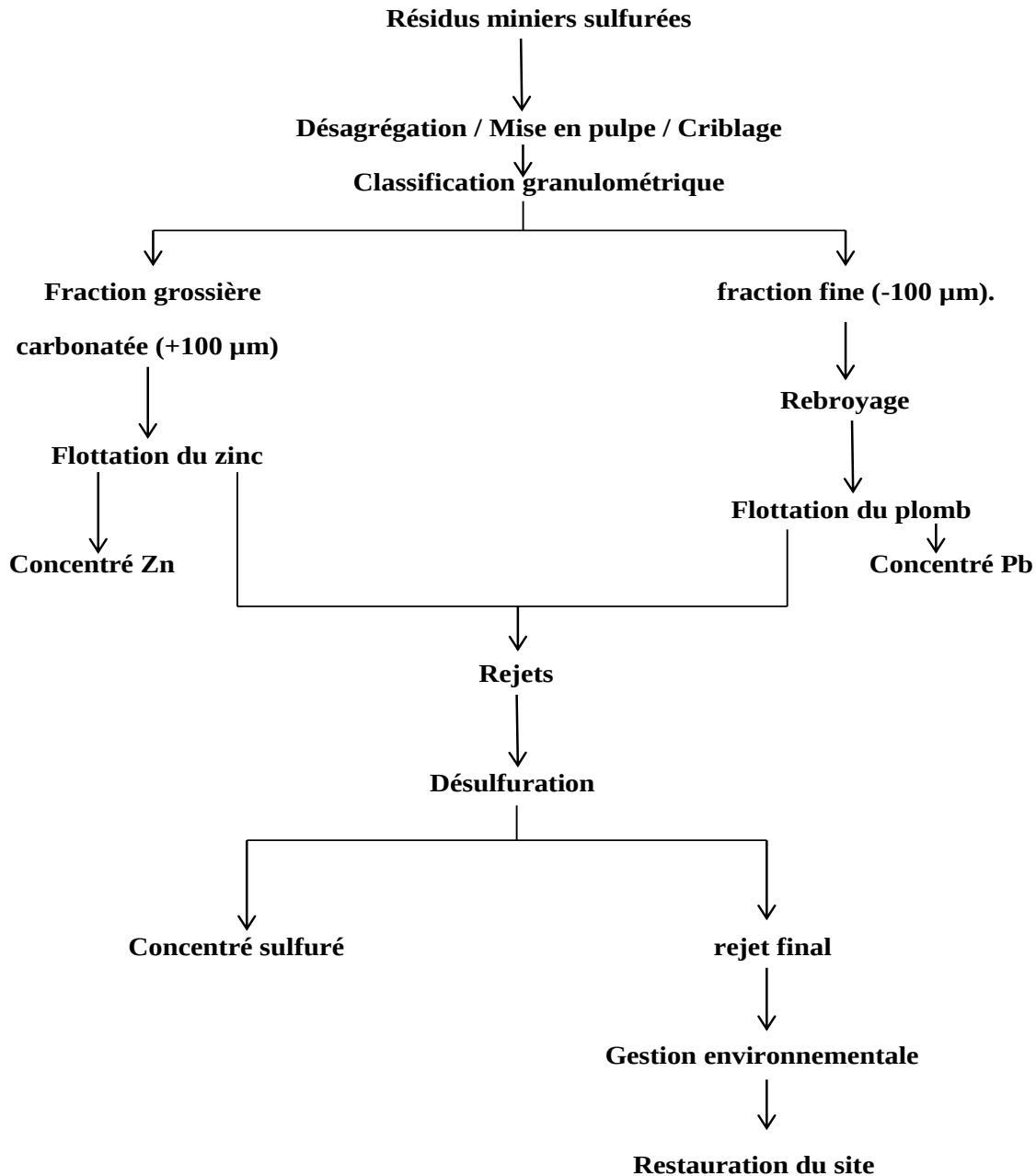


Figure IV.6: Schéma intégré de retraitement et de valorisation des résidus miniers

Tableau IV.7: Retraitement et de valorisation des résidus miniers

Étape	Description technique	Objectif	Équipement / Réactifs
1. Désagrégation / Mise en pulpe / Criblage	Mélange des résidus avec de l'eau de procédé pour former une pulpe à environ 30-40 % de solides. Passage sur un crible vibrant (maille 2-5 mm) pour éliminer les débris végétaux, racines et blocs stériles.	Homogénéiser l'alimentation et protéger les équipements aval.	Crible vibrant, cuve d'agitation, pompes.
2. Classification granulométrique	La pulpe criblée est envoyée dans un cyclone ou un tamis vibrant de coupure à 100 µm. La fraction grossière (+100 µm) est séparée de la fraction fine (-100 µm).	Séparer une fraction pauvre en métaux et riche en carbonates, qui servira d'agent neutralisant pour la réhabilitation. Réduire la masse à rebroyer.	Cyclone (hydrocyclone) ou tamis vibrant à haute fréquence.
3. Rebroyage de la fraction fine	La fraction fine (-100 µm) est introduite dans un broyeur à boulets (ou broyeur à barres) fonctionnant en circuit fermé avec un cyclone de classification. L'objectif est d'atteindre une granulométrie d80 de 53 à 75 µm pour améliorer la libération de la sphalérite.	Augmenter la récupération du zinc en libérant les particules de sphalérite encore incluses dans la gangue ou associées à la pyrite.	Broyeur à boulets, cyclone de classification, pompes.
4. Flottation du plomb (Circuit Pb)	La pulpe rebroyée est conditionnée successivement avec : - NaCN (50 g/t) : déprime la sphalérite et la pyrite. - KEX (60 g/t) : collecteur sélectif de la galène. - MIBC (20 g/t) : moussant. Le pH est maintenu naturel (7-8). Flottation pendant 5-8	Produire un concentré de plomb commercialisable (≥ 45 % Pb) avec une haute récupération.	Cellules de flottation, conditionneurs.

	minutes.		
5. Flottation du zinc (Circuit Zn)	Le rejet de la flottation Pb est conditionné avec : - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (200-250 g/t) : active la surface de la sphalérite. - Chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) : élève le pH à 10,5-11,0 pour déprimer la pyrite. - PAX (100-120 g/t) : collecteur de la sphalérite. - MIBC (20 g/t). Flottation pendant 10-15 minutes.	Produire un concentré de zinc commercialisable ($\geq 40\%$ Zn) avec une récupération maximale.	Cellules de flottation, conditionneurs, système de contrôle du pH.
6. Désulfuration environnementale (Flottation Pyrite)	Le rejet de la flottation Zn est acidifié à pH 5,0 avec H_2SO_4. Ajout de CuSO_4 (50-60 g/t) comme activateur, puis de PAX (120-160 g/t) comme collecteur de la pyrite. Flottation pendant 10 minutes.	Isoler la pyrite résiduelle dans un concentré de faible volume, réduisant ainsi drastiquement la teneur en soufre et le potentiel acidogène du rejet final.	Cellules de flottation, conditionneurs, contrôle du pH.
7. Gestion des concentrés	- Concentré Pb et Zn : épaisissage, filtration, séchage si nécessaire, stockage en silos étanches, expédition vers fonderie. - Concentré de pyrite : stockage dans une cellule confinée avec couverture calcaire (mélange de calcite/dolomite) pour neutraliser l'acidité générée lors de l'oxydation. Possibilité de valorisation comme source de soufre pour production d'acide sulfurique.	Valorisation économique des métaux et confinement du risque environnemental.	Épaississeurs, filtres presses ou filtres à bande, séchoirs rotatifs.
8. Gestion du rejet final	Épaississage et filtration du rejet de flottation pyrite. Le gâteau de filtration (teneur en eau ~15-20	Produire un matériau solide, stable	Épaississeur, filtre presse,

désulfuré	%) est transporté vers la zone de restauration.	chimiquement, apte au remblayage et à la revégétalisation.	convoyeurs.
9. Restauration du site	Le rejet désulfuré est mélangé avec la fraction grossière carbonatée mise de côté à l'étape 3. Ce mélange est utilisé pour combler la digue existante, remodeler la topographie et créer une couche de surface fertile. Un amendement organique (compost) peut être ajouté avant la plantation d'espèces végétales locales résistantes aux métaux (phytostabilisation).	Réhabiliter le site minier, supprimer le risque de drainage acide, et restaurer un écosystème fonctionnel.	Engins de terrassement (bulldozer, niveleuse), épandeurs d'amendements, plants.

IV.9 Drainage minier acide (DMA)

Le terme drainage minier acide (DMA) ou bien drainage rocheux acide (DRA) est utilisé dans le but de décrire le drainage résultant d'une oxydation naturelle ou bien des minéraux sulfurés se trouvant dans les gisements miniers ou leurs rejets qui sont exposés à l'air libre ou bien à l'eau.

Ceci est une conséquence de l'oxydation des sulfures dans les matériaux ayant un état d'oxydation élevé ou bien, dans le cas de présence du fer en solution dans un état instable, il y'aurait une précipitation du fer ferrique avec de l'hydroxyde. Ceci peut être associé aussi bien à des travaux souterrains qu'à des travaux à ciel ouvert ou bien aux amas, aux rejets du concentrateur (tailings) ou aux substances minières stockées.

Le drainage minier acide est responsable des problèmes de la pollution des eaux dans la plupart des mines de charbon et des mines ayant des gisements métallifères à travers le monde. Cependant, un drainage minier acide ne peut avoir lieu si les minéraux sulfurés ne réagissent pas ou bien si la roche ne comporte pas une quantité su sante de matériaux alcalins ayant une capacité à neutraliser les acides. [17]

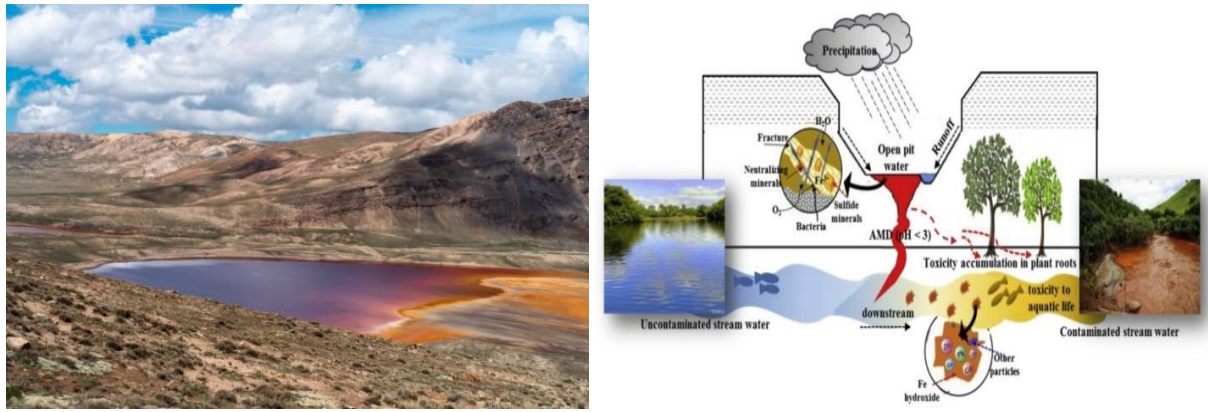
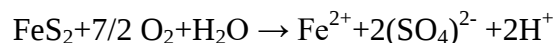


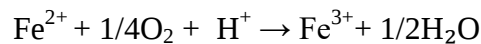
Figure IV.7 : Effet du drainage minier acide

IV.9.1 Réactions chimiques du DMA :

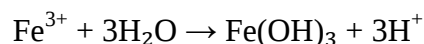
Les réactions de production de DMA peuvent être illustrées par l'examen de l'oxydation de la pyrite (FeS_2). La première réaction chimique consiste à l'oxydation de la pyrite par l'oxygène (O_2) et l'eau (H_2O). Cette réaction libère des ions de fer ferreux (Fe^{2+}), des sulfates (SO_4^{2-}) et des ions hydrogènes (H^+). Ces derniers acidifient le milieu. Traitement du Drainage minier acide Malgré l'existence de plusieurs méthodes de traitement de DMA, la durabilité de ces dernières se définit comme facteur critique pour la prise [43]



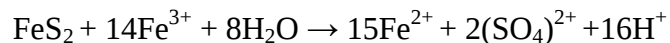
En fonction de la concentration en oxygène et du pH du milieu, la majorité du fer ferreux s'hydrolyse en fer ferrique (Fe^{3+}).



le Fe^{3+} se précipite sous forme d'hydroxyde ferrique ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) et peut aussi se cristalliser en jarosite, laissant peu de Fe" en solution tout en réduisant simultanément le PH (Akciil and Koldas, 2006).



Ainsi, le Fe^{3+} de la deuxième équation qui ne se précipitera pas à la troisième équation et oxydera davantage de pyrite si le pH demeure sous 4,0.



IV.9.2 Méthodes de traitement de DMA

❖ Le traitement actif

Les traitements actifs représentent une solution intéressante pouvant neutraliser des quantités importantes d'effluents de DMA à court terme, ce type de traitement est appelé actif car il nécessite l'emploi de technologies chimiques ou physico-chimiques qui doivent être

suivis et entretenues, la neutralisation des effluents se fait dans un bassin où l'on laisse réagir les métaux et les réactifs alcalins entraînant la remontée du pH et la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes ou d'oxyhydroxydes. Les réactifs les plus utilisés dans ce type de traitement sont le calcaire, la chaux hydratée, la chaux vive, le carbonate de soude, la soude caustique, l'hydroxyde de magnésium, le sulfure de sodium, l'ammoniac, le peroxyde de calcium, la poussière de four à ciment et les cendres volantes.

❖ **Le traitement passif**

Il devient difficile de justifier le traitement actif à perpétuité, particulièrement dans le contexte du développement durable. C'est pourquoi les systèmes de traitement passifs, qui utilisent des processus chimiques et biologiques, deviennent de plus en plus une alternative intéressante, notamment car ils présentent une panoplie d'avantages par rapport aux systèmes de traitement actifs, on citera :

- Une faible dépense en énergie et en apport de réactifs
- L'utilisation de produits naturels
- Une consommation en eau faible voire nulle
- Une efficacité comparable aux meilleurs systèmes actifs existants
- Un aspect esthétique plus satisfaisant
- Une quantité de boue générée insignifiante

Le choix d'une méthode de traitement passif se base généralement sur la nature du sol infecté, des taux d'humidité et d'air présents dans la zone à traiter, de la minéralurgie des résidus, mais surtout du débit et de la chimie des eaux du drainage minier nous permet de savoir quel système de traitement passif utiliser pour une eau quelconque. [34]

IV.10 Stratégie Réhabilitation du site

La réhabilitation des résidus miniers constitue une étape essentielle pour réduire les impacts environnementaux liés à l'exploitation minière, notamment la génération du drainage minier acide (DMA), la dispersion des métaux lourds et l'érosion des digues de stockage. Dans le cas des résidus de Chaâbat El Hamra, la présence de sulfures tels que la pyrite, associée à des éléments potentiellement toxiques comme le plomb, le zinc et le cadmium, nécessite la mise en œuvre de mesures de réhabilitation adaptées. L'objectif principal de la

réhabilitation est de stabiliser physiquement et chimiquement les résidus afin de limiter leur interaction avec l'eau et l'oxygène, responsables des phénomènes d'oxydation des sulfures. Parmi les principales techniques de réhabilitation utilisées pour les résidus miniers sulfurés, on distingue :

IV.10.1 Recouvrement des résidus

Cette technique consiste à recouvrir les résidus par une couche de matériaux imperméables ou faiblement perméables afin de limiter l'infiltration de l'eau et la diffusion de l'oxygène vers les sulfures. Les matériaux utilisés peuvent être : des argiles, des sols naturels, des géomembranes, ou des matériaux alcalins. Le recouvrement permet ainsi de réduire considérablement les réactions d'oxydation responsables de la formation du drainage minier acide.



Figure IV.8 : Recouvrement des résidus miniers par une couverture étanche limitant l'infiltration de l'eau et la diffusion de l'oxygène.

IV.10.2 Neutralisation chimique

La neutralisation chimique vise à diminuer l'acidité générée par les sulfures à l'aide de matériaux alcalins riches en carbonates, tels que : la chaux, le calcaire, ou la dolomite. Ces matériaux réagissent avec les ions acides et contribuent à maintenir un pH favorable limitant la mobilité des métaux lourds.

IV.10.3 Revégétalisation

La revégétalisation consiste à planter une couverture végétale sur les résidus afin de stabiliser les sols, réduire l'érosion éolienne et hydrique, améliorer l'intégration paysagère du site, et limiter la dispersion des particules contaminées. Cette technique nécessite

généralement l'ajout de matière organique et d'amendements afin d'améliorer les propriétés physico-chimiques des résidus.



Figure IV.9 : Revégétalisation des résidus miniers pour assurer la stabilité des sols et réduire l'érosion.

IV.10.4 Gestion des eaux de drainage

La gestion des eaux contaminées représente également une étape importante de la réhabilitation. Elle comprend : la collecte des eaux de drainage, le traitement des effluents acides, et le contrôle des concentrations en métaux dissous avant leur rejet dans l'environnement.



Figure IV.10 : Système de collecte et de traitement des eaux de drainage contaminées.

IV.10.5 Valorisation des résidus miniers

La valorisation des résidus constitue une solution durable permettant à la fois de réduire les volumes stockés et de récupérer les métaux encore présents dans les rejets. Les essais de flottation réalisés sur les résidus de Chaâbat El Hamra montrent des possibilités intéressantes de récupération du zinc et du plomb. Cette approche contribue non seulement à la réduction des impacts environnementaux, mais également à la valorisation économique des déchets

miniers. Conclusion Les techniques de réhabilitation appliquées aux résidus miniers de Chaâbat El Hamra visent principalement à limiter les phénomènes d'oxydation des sulfures et la mobilité des éléments toxiques.

La combinaison du recouvrement, de la neutralisation chimique, de la revégétalisation et de la valorisation minéralurgique constitue une approche efficace pour assurer la stabilité environnementale du site sur le long terme.

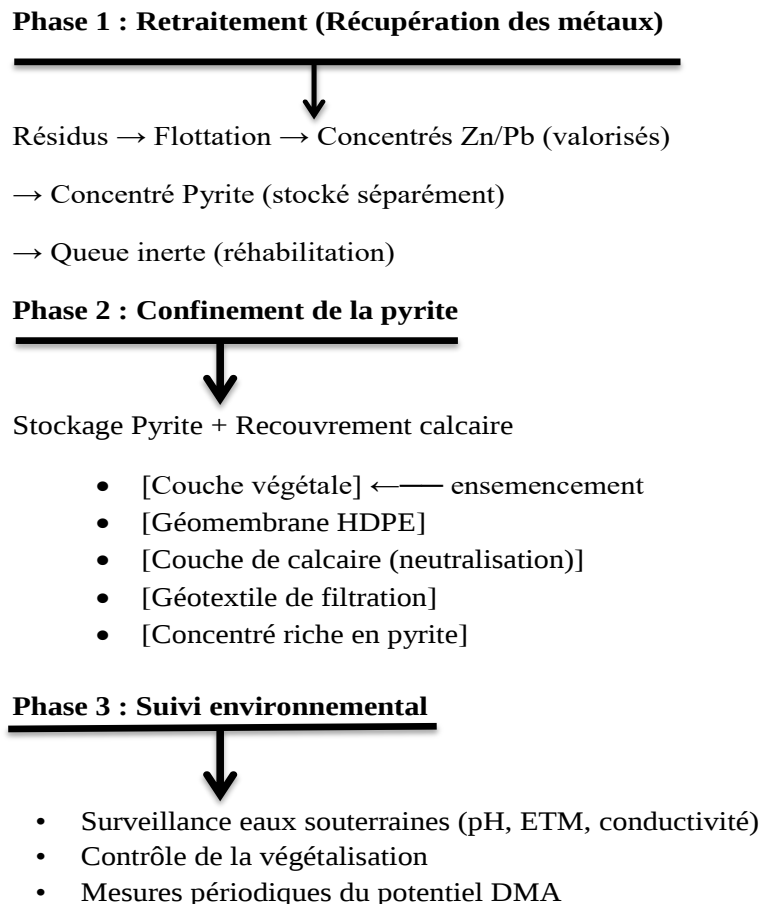


Figure IV.11 : Schéma global de réhabilitation

IV.10.6 Évolution du cadre législatif et réglementaire algérien

La valorisation des résidus miniers s'inscrit désormais dans un cadre légal en pleine mutation en Algérie, visant à encourager l'investissement et la durabilité.

- ❖ **Loi 14-05 (2014)** : Elle a instauré l'obligation de restauration des sites et la mise en place de provisions financières pour la remise en état après exploitation. [44]
- ❖ **Loi 25-12 (Août 2025)** : Ce nouveau texte abroge les réglementations antérieures et marque une ouverture vers l'investissement privé et étranger (jusqu'à 80 % de

participation) [45] Elle définit explicitement l'exploitation des "haldes et terrils" comme une activité minière à part entière (Article 18). [46]

- ❖ **Exigences environnementales** : La nouvelle loi impose une étude d'impact environnemental préalable et un plan de réhabilitation détaillé incluant le démantèlement des installations et la sécurisation des dépôts de résidus. [47]
- ❖ **Normes de valorisation** : L'utilisation des rejets hors site doit se conformer aux normes de l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR), notamment les équivalents nationaux des normes ISO 14001 (management environnemental) et les normes techniques sur les granulats. [48]

IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes possibilités de retraitement et de valorisation des résidus miniers sulfurés ont été présentées à travers l'étude de plusieurs techniques telles que la flottation, la lixiviation, la séparation gravimétrique et la séparation magnétique. Les essais réalisés sur les résidus de Chaâbet-El Hamra ont permis d'évaluer leur potentiel de récupération en métaux utiles, notamment le plomb et le zinc.

Les résultats obtenus montrent que ces résidus peuvent constituer une ressource secondaire valorisable tout en contribuant à la réduction des impacts environnementaux. Enfin, les aspects liés au drainage minier acide et aux méthodes de réhabilitation ont mis en évidence l'importance d'une gestion durable des résidus miniers après traitement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce document constitue une contribution significative à la connaissance et à la valorisation des résidus miniers de Chaabat El Hamra, un site emblématique du patrimoine minier algérien qui, comme de nombreux sites similaires à travers le monde, représente simultanément un passif environnemental et un gisement secondaire de ressources métalliques.

Le premier chapitre nous a présenté le site géologiquement. Ain Azel se caractérise par la présence de gisements de type sulfures massifs de plomb-zinc, dont l'exploitation nécessite la mise en œuvre de procédés de traitement adaptés, notamment le broyage et la flottation. Cette dernière est principalement orientée vers la récupération du zinc, considéré comme le principal élément valorisé.

Au terme du second chapitre, il apparaît que le traitement des minerais sulfurés constitue une étape fondamentale dans la valorisation des métaux de base tels que le zinc, le plomb et le cuivre. Ces métaux, bien que largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels, se présentent généralement sous forme de minerais complexes associés à des minéraux sulfurés, ce qui rend leur extraction et leur séparation particulièrement exigeantes sur le plan technique. L'étude des propriétés physico-chimiques de ces éléments, ainsi que celle des minéraux associés comme la pyrite, permet de mieux comprendre leur comportement au cours des différentes étapes de traitement.

Le troisième chapitre, consacré à la caractérisation multi-technique des résidus, a permis d'établir un portrait complet et cohérent de ces matériaux. Les résultats ont révélé que les résidus contiennent des teneurs résiduelles significatives en zinc (1,5-5 %) et en plomb (0,5-3 %), distribuées entre plusieurs formes minéralogiques distinctes : sulfures primaires (sphalérite, galène), carbonates secondaires (smithsonite, cérusite), et phases adsorbées sur les oxyhydroxydes de fer. La granulométrie majoritairement fine, le degré de libération partiel des phases d'intérêt et le potentiel modéré de génération de drainage minier acide constituent des paramètres clés pour la conception des procédés de valorisation.

Le quatrième chapitre a exploré de manière systématique les différentes voies de valorisation applicables à ces résidus, en examinant les procédés physiques (séparation gravimétrique, flottation, séparation magnétique), chimiques (lixiviation acide, alcaline, par complexation), biologiques (biolixiviation) et pyrométallurgiques. Un schéma de traitement intégré,

combinant pré-concentration gravimétrique, flottation différentielle et lixiviation acide, a été proposé comme approche optimale, offrant des récupérations globales de 60 à 80 % du zinc et de 50 à 70 % du plomb. Les possibilités de valorisation non métallique des résidus finaux, comme matériaux de construction ou comme remblai minier cimenté, ont également été mises en évidence, s'inscrivant dans une logique de "zéro déchet".

Au-delà des résultats techniques, ce travail souligne l'importance d'une approche intégrée et multidisciplinaire de la gestion des résidus miniers, associant géologie, minéralogie, chimie, génie des procédés, sciences de l'environnement et économie. Il démontre que la transformation des résidus miniers en ressources secondaires est non seulement possible mais souhaitable, tant du point de vue économique qu'environnemental.

Les perspectives de ce travail incluent la réalisation d'essais pilotes pour valider les performances des procédés identifiés à une échelle représentative, l'évaluation détaillée de l'impact environnemental du retraitement, l'étude de la récupération des éléments traces à haute valeur ajoutée (argent, indium, germanium) qui pourraient constituer des co-produits intéressants, et l'analyse de la faisabilité économique dans le contexte spécifique du marché algérien. À plus long terme, les méthodologies développées dans cette étude pourront être transposées à d'autres sites miniers algériens présentant des problématiques similaires, contribuant ainsi à la construction d'une filière nationale de valorisation des résidus miniers.

Références bibliographiques

- [1] **BOUTALEB, A. (2001).** Les minéralisations à Pb-Zn du domaine sétifien (Algérie nord-orientale) : Gîtologie, pétrographie et géochimie. Thèse de doctorat, Université de Sétif, Algérie.
- [2] **LOTTERMOSER, B.G. (2010).** Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, 3rd edition. Springer, Berlin, 400 p.
- [3] **AISSA, D.E., MARIGNAC, C., CHEILLETZ, A. (2014).** Pb-Zn mineralization in the Ain Azel area, Hodna Mountains, Algeria: Geological setting and ore genesis. *Journal of African Earth Sciences*, 97, 1-18.
- [4] **(Zaabar et al., 2018). ZAABAR, N., BEBBA, A.A., BASTA, A.H. (2018).** Environmental assessment of abandoned Pb-Zn mine tailings in northeastern Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 77(15), 549.
- [5] **(Jambor et Blowes, 1994 ; Bussière, 2007).** JAMBOR, J.L., BLOWES, D.W. (1994). *Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, Volume 22, 438 p.
- (BUSSIÈRE, B. (2007).** Colloquium 2004: Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.
- [6] **WILLS, B.A., FINCH, J.A. (2016).** Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 8th edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 498 p.
- [7] **GY, P.M. (1992).** Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems: Theories of Heterogeneity, Sampling and Homogenizing. Elsevier, Amsterdam, 653 p.
- [8] **Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2004).** A Laboratory Study of Covers Made of Low-Sulphide Tailings to Prevent Acid Mine Drainage. *Environmental Geology*, 45(5), 609–622.
- [9] **AKACHE Aymen et BEDGHIOU Kaouther (2021) :** Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux : (Cas de la mine de Kherzet Youcef – Setif) Mémoire de fin d'études.
- [10] **Khalfi A. et Taleb C (2014) :** Contribution à l'étude d'impact environnemental de l'exploitation minière souterraine et de rejets de traitement (cas de la mine de Chaâbet-El Hamra. Ain Azel. Sétif) Mémoire de fin d'études.
- [11] **Nakib AMARI (2023):** Utilisation des rejets miniers des districts de Kherzet Youcef (W.Setif) et de Boucaïd (W.Tissemsilt) pour la confection du béton : Etude de leurs comportements mécanique et environnemental Thèse de doctorat.

- [12] **Medjitena Mehdi (2017)** : Valorisation des rejets miniers plombo-zincifères de la mine de Kherzet-Youcef (W.Setif) par flottation et pré-traitement gravimétrique Mémoire de magister.
- [13] **Radouane Nakache (2021)** : Analyse des méthodes de stabilité des mines souterraines et leurs applications dans la mine de Châabet El Hamra – Algérie Mémoire de master.
- [14] Rapport Géologique du Gisement de Zincifère de Chaabet el hamra
- [15] **Mr.Ait Kaid Yassine (2009)**: Etude économique de l'Exploitation de la partie inférieure du gisement de Zn de Chaâbet El-Hamra et sensibilité des paramètres production, teneur, tout venant, cours métal et investissement projet de fin d'études.
- [16] **SALAH AHMED (2011)** : Extraction de Zinc dans les résidus solides de la lixiviation par Procédé Jarosite en utilisant les sels alcalins. (Société ALZINC).
- [17] **Medjitena Mehdi et Mekdour Mohamed Islem (2017)**: Traitement et caractérisation des rejets de la mine de Boucaid (W.Tissemsilt) et de la mine de Kherzet-Youcef (W.Sétif).
- [18] **Dr. GHOMARI Fouad** : science des matériaux de construction. Support de cours
- [19] **Badr N. (2013)**: «Treatment of wastewater containing arsenic using Rhazya stricta as a new adsorbent», Environ Monit Assess; 185(12): p9669–9681.
- [20] **Dr. Boudemagh K** : cours du Plomb. Support pédagogique
- [21] **Divet, L (1996)**: Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats Synthèse bibliographique.
- [22] **Banks et al. (1997); Jambor et Blowes, 1998; Yigit et Safat, 2004 ; Consas et al., (2005)**: Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings.
- [23] **Derycke, V (2012)**: Optimisation de la désulfuration de produits miniers en vue de la diminution de leur potentiel polluant : effet de la granulométrie, du type de sulfures et évaluation de la qualité des eaux de drainage post-traitement. Thèse de doctorat.
- [24] **Bouchard, S., 2001**. Traitement du minerai : Flottation – Méthode physique, Ed. Le Griffon d'argile, pp 206 – 230.
- [25] **MERCHICHI Amira (2013)** : étude géochimique et traitement des rejets de la digue provenant de la mine de kherzet youcef et chaabet el hamra. Mémoire de magister
- [26] **Dr soudani Asma** : cours de Lixiviation des minerais. Support pédagogique
- [27] **International Organization for Standardization (ISO), 2016**. Analyse chimique. Genève, Suisse : Organisation internationale de normalisation.
- [28] **SALOMONS, W. (1995)**. Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, 52(1-2), 5-23.

- [29] **JAMBOR, J.L., BLOWES, D.W. (1994).** Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, Volume 22, 438 p.
- [30] **BENABBES Lamia (2019):** Les expériences sont réalisées au laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement du département des mines (LAVAMINE) de l'université d'Annaba.
- [31] **Blowes, D. W. et al. (2014):** Acid Mine Drainage Geochemistry, Treatise on Geochemistry.
- [32] **Guirous Namira :** essai de valorisation du minerai de fer de gara djebilet par la methode de la separation magnetique-flottation
- [33] **COOK N.J., CIOBANU C.L., PRING A., SKINNER W., SHIMIZU M., DANYUSHEVSKY L., SAINI-EIDUKAT B., MELCHER F. (2009).** Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761-4791.
- [34] **PLANTE B., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M. (2012).** Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, 114, 57-69.
- [35] Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaâbet 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 2007/2008.
- [36] **Wills, B.A., Finch, J.A. (2016).** Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [37] **Marsden, J., House, I. (2006).** The Chemistry of Gold Extraction (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Littleton, Colorado, USA.
- [38] **Svoboda, J. (2004).** Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- [39] **ALLOUACHE, M. (1999).** Valorisation de la pyrite de Chaabet El Hamra (Sétif). Mémoire d'ingénieur d'État en Génie Minier.
- [40] **Benabbes, L., & Bounouala, M. (2020).** Environmental protection against acid mine drainage (AMD) testing... *Mining Science*, 27, 323–335. DOI: 10.37190/msc202721
- [41] **Gouisssem, KH. (2001).** Augmentation du taux de récupération du zinc du minerai sulfure du gisement de chaabet EL-Hamra. Mém de fin d'etudes de l'école nationale polytechnique.v
- [42] **Anfel Khalfi Toufik Belamri :** Neutralisation des drainages miniers acides par l'utilisation des matériaux naturels.

[43] **Dr Belghit takoua** : cour de Drainage minier acide

[44] Loi n° 14 - 05 du 24 du Rabie Ethani 1435 correspondant au 24 février 2014 portant loi minière

[45] La réforme du secteur minier algérien : La loi n° 25-12 du 3 août 2025 régissant les activités minières

[46] journal officiel de la republique algerienne n° 52

[47] Le Marché des mines en Algérie - undefined - Team France Export

[48] Revue de la réglementation sur la valorisation des résidus miniers hors site au Québec - PolyPublie

Webographiques

- [49] [https://www.dangereux.fr/toxicite du zinc pour l homme.html](https://www.dangereux.fr/toxicite_du_zinc_pour_l_homme.html)
- [50] <https://www.karmantra.fr/blog/pyrite/proprietes-physiques-et-chimiques-de-la-pyrite.html>
- [51] <https://www.samaterials.fr/blog/copper-element-properties-and-uses.html>
- [52] <https://www.legarrec.com/entreprise/effluent-definition/>
- [53] <https://www.eau-et-rivieres.org/http%3A//www.eau-et-rivieres.org/mines>
consequences-eau
- [54] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/inductively-coupled-plasma>
- [55] <https://www.alsglobal.com/fr/geochemistry/rock-characterisation/sulphur-and-carbon-analysis>